



**Ana Rita  
Almeida e Costa**

**FORMULAÇÃO E DESEMPENHO DE MISTURAS  
BETUMINOSAS TEMPERADAS**





**Ana Rita  
Almeida e Costa**

## **FORMULAÇÃO E DESEMPENHO DE MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizado sob orientação científica do Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta, professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.



“Thank you for making me laugh when I’d most forgotten how to.” – Pam Brown  
This work is dedicated to everyone who supported me throughout this journey,  
especially my parents.



## **o júri**

Presidente

Professor Doutor Paulo Barreto Cachim  
Professor associado da Universidade de Aveiro

Arguente

Professor Doutor Silvino Dias Capitão  
Professor coordenador do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Orientador

Professor Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta  
Professor auxiliar da Universidade de Aveiro





## agradecimentos

A quem pontual, esporádica ou continuamente me apoiou, quero manifestar o meu sincero agradecimento:

- Ao meu orientador, Doutor Eng.<sup>o</sup> Agostinho Benta, por me ter proporcionado esta oportunidade, por todos os conhecimentos transmitidos, pela disponibilidade constante em me ajudar e, pelo apoio prestado a todos os níveis;
- À ProbiGalp – Ligantes Betuminosos, S.A. e ao laboratório NIDIN, na pessoa da Eng.<sup>a</sup> Cátia Duarte, orientadora de estágio, pela oportunidade de realização de estágio, possibilitando-me uma aproximação ao universo de trabalho e à experiência profissional;
- Ao Sr. Augusto Almeida, chefe de laboratório, pelo auxílio que me prestou nos ensaios e na sua análise. À Inês Marques, por me ter ajudado em tudo o que lhe foi possível. Ao Ulisses Teixeira, por toda a paciência, amizade e companheirismo, capazes de aligeirar qualquer dia menos bom. A todos os responsáveis pela produção, nomeadamente, ao Fernando Ferreira pela sua animação e alegria constantes, ao Sr. José por ter sido sempre prestável e, especialmente, ao Miguel Antunes, pela ajuda constante, mas sobretudo pela amizade e por todos os conselhos;
- Pela disponibilização dos agregados, usados na realização dos estudos, ao Eng.<sup>o</sup> Nelson Gonçalves, da Betnor, ao Eng.<sup>o</sup> Nuno Namorado, da Alves Ribeiro, ao Sr. Paulo Areosa, da Asibel e às Construções Pragosa;
- À Ana Gameiro, colega de estágio, por todo o apoio, confiança e motivação, ao longo de vários meses, nos bons e maus momentos desta jornada;
- Aos meus amigos, que, por razões óbvias, mesmo longe, sempre me motivaram, dando forças para concluir os meus objetivos. Um especial “obrigada” à Tânia Dias por ser incansável;
- À Anabela Vieira, que conheci ao mudar-me para Rio Maior, onde realizei o estágio, por ter sido minha amiga e confidente;
- Aos meus pais e irmã, sem os quais nada disto teria sido possível. Por serem os pilares da minha vida;
- Ao Sérgio Cunha, pelo seu incondicional apoio e carinho, que fizeram e fazem todas as dificuldades valerem a pena.

Rita Costa

2013



## **palavras-chave**

Misturas betuminosas temperadas, redução de emissões, benefícios ambientais e socioeconômicos, betumes, aditivos, desempenho mecânico

## **resumo**

As misturas betuminosas temperadas surgiram como resposta à necessidade de reduzir os custos energéticos e as emissões de gases de efeito de estufa causados pelas centrais de produção de misturas betuminosas a quente.

Neste trabalho foi desenvolvido um primeiro estudo, com o objetivo de verificar se o desempenho mecânico de uma mistura betuminosa de alto módulo, produzida a temperaturas inferiores às convencionais, através da introdução de um aditivo químico, não ficaria comprometido face a uma mistura padrão.

No segundo estudo foi formulado um betão betuminoso rugoso, produzido a temperaturas inferiores às convencionais, através da introdução de um aditivo orgânico e foi avaliado se o seu desempenho mecânico não ficaria comprometido face a uma mistura de padrão. Para esta mistura foi avaliada a interação entre o aditivo e o betume modificado com polímero, assim como foi avaliada a possível redução de temperaturas.

A avaliação do desempenho final das misturas consistiu na sua caracterização em termos de sensibilidade à água, resistência à deformação permanente, módulo de rigidez e resistência à fadiga.

De forma a confirmar as vantagens da aplicação definitiva das misturas betuminosas temperadas, foi determinada a redução de consumo energético no aquecimento dos componentes das misturas, que se repercute na diminuição dos custos de aquisição dos combustíveis, bem como na diminuição das emissões de gases nocivos.

Os resultados indicam que as misturas betuminosas temperadas se comportam de forma muito semelhante às misturas betuminosas convencionais, sugerindo que estas serão capazes de suportar as solicitações impostas pelo tráfego. Todavia, existem alguns campos onde deverão ser desenvolvidos estudos adicionais, nomeadamente no que diz respeito à sensibilidade à água.



**keywords**

Warm mix asphalt, emissions reduction, environment, economic and social benefits, bitumens, additives, mechanical performance

**Abstract**

Warm mix asphalt emerged in response to the need to reduce energy costs and emissions of greenhouse gases caused by hot mix asphalt plants.

A first study was developed in this work in order to verify if the mechanical performance of a high modulus asphalt mixture, produced at temperatures lower than conventional, by introduction of a chemical additive, wouldn't be compromised, when compared to a standard mix.

In the second study, a rough asphalt concrete was formulated, produced at temperatures lower than conventional, by introduction of an organic additive, and it was evaluated if the mechanical performance wouldn't be compromised, when compared to a standard mix. Concerning this mixture, the interaction between the additive and polymer modified bitumen was assessed, as well as evaluated the possible reduction of temperatures.

The analysis of the mixtures final performance consisted in the characterization in terms of water sensitivity, resistance to permanent deformation, stiffness modulus and fatigue resistance.

In order to confirm the advantages of permanent application of warm mix asphalt, the reduction energy consumption in the mixtures components heating was determined, which reflects in the decrease of the fuel acquisition costs as well as lower harmful gases emissions.

The results indicate that warm mix asphalt behaves very similarly to conventional mixtures, suggesting that they will be capable of withstanding the loads imposed by traffic. However, there are some fields requiring additional studies, particularly as regards to water sensitivity.



## ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE EQUAÇÕES.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	XI
ÍNDICE DE TABELAS.....	XIII
SIMBOLOGIA .....	XVII
1. INTRODUÇÃO.....	3
1.1. Enquadramento Temático.....	3
1.2. Objetivos e Metodologia .....	4
1.3. Organização dos Conteúdos.....	4
2. ESTADO DA ARTE.....	9
2.1. Misturas Betuminosas.....	9
2.1.1. Metodologias de Formulação.....	9
2.1.2. Ligantes.....	11
2.2. Caracterização de Betumes.....	15
2.2.1. Penetração a 25°C.....	15
2.2.2. Temperatura de Amolecimento.....	16
2.2.3. Viscosidade Cinemática.....	16
2.2.4. RTFOT – Determinação da Resistência ao Envelhecimento.....	17
2.2.5. Recuperação Elástica.....	18
2.2.6. Estabilidade ao Armazenamento .....	18
2.3. Ensaio de Caracterização de Misturas Betuminosas.....	18
2.3.1. Máxima Baridade Teórica .....	19
2.3.2. Módulo de Rigidez .....	20
2.3.3. Sensibilidade à Água .....	21
2.3.4. Resistência à Deformação Permanente.....	23
2.3.5. Resistência à Fadiga .....	25
2.4. Misturas Betuminosas Temperadas.....	28
2.4.1. História das Misturas Betuminosas Temperadas .....	30
2.4.2. Benefícios das Misturas Betuminosas Temperadas.....	32
2.4.3. Tecnologias de Produção de Misturas Betuminosas Temperadas .....	38
3. DESEMPENHO LABORATORIAL DE MISTURA BETUMINOSA TEMPERADA DO TIPO AC 20 BASE LIGANTE (MBAM).....	47
3.1. Caracterização dos Agregados.....	48

3.2.	Caracterização dos Ligantes .....	50
3.3.	Caracterização das Misturas .....	50
3.3.1.	Máxima Baridade Teórica .....	51
3.3.2.	Sensibilidade à Água.....	52
3.3.3.	Resistência à Deformação Permanente .....	53
3.3.4.	Módulo de Rigidez .....	55
3.3.5.	Resistência à Fadiga.....	57
3.4.	Discussão dos Resultados .....	60
4.	FORMULAÇÃO E DESEMPENHO LABORATORIAIS DE MISTURA BETUMINOSA TEMPERADA DO TIPO AC14 SURF (BBr) .....	65
4.1.	Caracterização dos Agregados .....	66
4.1.1.	Granulometria .....	68
4.1.2.	Massas Volúmicas e Absorção .....	70
4.2.	Estudo da Interação Ligante-Aditivo.....	71
4.2.1.	Determinação das Características dos Ligantes.....	72
4.2.2.	Avaliação da Viscosidade Dinâmica.....	77
4.3.	Otimização das Temperaturas de Mistura e Compactação .....	82
4.4.	Estudo de Marshall – Percentagem Ótima de Betume .....	84
4.4.1.	Análise e Discussão dos Resultados.....	90
4.5.	Caracterização das Misturas .....	90
4.5.1.	Máxima Baridade Teórica .....	90
4.5.2.	Sensibilidade à Água.....	91
4.5.3.	Resistência à Deformação Permanente .....	92
4.6.	Discussão dos Resultados .....	94
5.	ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÓMICA E DE IMPACTE AMBIENTAL .....	99
5.1.	Estudo de Viabilidade Económica .....	101
5.1.1.	Redução do Consumo Energético.....	101
5.1.2.	Estimativa da Poupança.....	105
5.1.3.	Análise dos Resultados.....	108
5.2.	Estudo de Impacte Ambiental.....	110
6.	CONCLUSÕES .....	115
6.1.	Considerações Finais.....	115
6.2.	Desenvolvimentos Futuros .....	116
	BIBLIOGRAFIA .....	121



ANEXO A.....	i
1. Dimensão e Baridade dos Provetes para o ensaio à Sensibilidade à Água (MBAM) .....	i
2. Volume dos Provetes do Subgrupo Húmido Após Vácuo (MBAM) .....	i
ANEXO B.....	iii
1. Dimensões das Lajes - <i>Wheel Tracking</i> – Mistura AC 20 Base (MBAM) .....	iii
2. Baridades das Lajes - <i>Wheel Tracking</i> – Mistura AC 20 Base (MBAM) .....	iii
3. Profundidade da Rodeira – RD <sub>AIR</sub> (MBAM) .....	iv
ANEXO C.....	v
1. Dimensões das Vigas – <i>Four Bending Point</i> – Mistura AC 20 Base (MBAM) .....	v
1.1. Mistura Betuminosa Quente .....	vii
1.2. Mistura Betuminosa Temperada.....	ix
2. Módulo de Rigidez e Ângulo de Fase (MBAM) .....	xi
2.1. Mistura Betuminosa Quente .....	xi
2.2. Mistura Betuminosa Temperada.....	xi
3. Resistência à Fadiga (MBAM) .....	xiii
3.1. Mistura Betuminosa Quente .....	xiii
3.2. Mistura Betuminosa Temperada.....	xvii
ANEXO D.....	xxi
1. Requisitos da Mistura AC 14 Surf (BBr) – CEEP .....	xxi
ANEXO E.....	xxiii
1. Fichas Técnicas dos Agregados.....	xxiii
1.1. Brita 10/16.....	xxiii
1.2. Brita 8/12,5.....	xxiv
1.3. Pó de Pedra 0/6 .....	xxv
1.4. Fíler Comercial.....	xxvi
ANEXO F.....	xxix
1. Estudo de Marshall (BBr) .....	xxix
ANEXO G .....	xxxiii
1. Dimensão e Baridade dos Provetes – Sensibilidade à Água (BBr) .....	xxxiii
2. Volume dos Provetes do Subgrupo Húmido Após Vácuo (BBr).....	xxxiii
ANEXO H.....	xxxv
1. Dimensões das Lajes – <i>Wheel Tracking</i> (BBr).....	xxxv
2. Baridade das Lajes – <i>Wheel Tracking</i> (BBr) .....	xxxv
3. Profundidade da Rodeira - RD <sub>AIR</sub> (BBr).....	xxxvi
ANEXO I .....	xxxvii
1. Relatórios de Ensaio do Betume .....	xxxvii
1.1. Amostra de PMB 45/80-65 .....	xxxviii

1.2.	Amostra de PMB 45/80-65 com 2% de Aditivo .....	xli
1.3.	Amostra de PMB 45/80-65 com 3% de Aditivo .....	xliv
1.4.	Amostra de PMB 45/80-65 com 4% de Aditivo .....	xlvi

## ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 – Viscosidade cinemática .....	17
Equação 2.2 – Correlação entre viscosidade cinemática e viscosidade dinâmica.....	17
Equação 2.3 – Rácio de resistência à tração indireta.....	23
Equação 2.4 – Taxa de variação da deformação permanente .....	25
Equação 2.5 – Número de ciclos de carga até a rotura em ensaio de fadiga com controlo à tensão .....	26
Equação 2.6 – Número de ciclos de carga até a rotura em ensaio de fadiga com controlo à extensão .....	27
Equação 3.1 – Máxima baridade teórica .....	51
Equação 3.2 – Lei de fadiga da MBAM convencional.....	58
Equação 3.3 – Lei de fadiga da MBAM temperada .....	59
Equação 4.1 – Massa volúmica do material impermeável das partículas .....	70
Equação 4.2 – Massa volúmica das partículas com superfície seca .....	70
Equação 4.3 – Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca.....	70
Equação 4.4 – Absorção de água .....	70
Equação 4.5 – Percentagem ótima de betume .....	85
Equação 5.1 – Energia de aquecimento dos agregados .....	102
Equação 5.2 – Energia de aquecimento da água.....	102
Equação 5.3 – Energia de vaporização da água.....	102
Equação 5.4 – Energia de aquecimento do vapor de água .....	102
Equação 5.5 – Energia de aquecimento do betume .....	102



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Penetrómetro e procedimento do teste de penetração a 25 °C (foto de autor – laboratório NIDIN e adaptado de FHWA (1982)).	16
Figura 2.2 – Esquematização e equipamento do ensaio da temperatura de amolecimento (foto de autor – laboratório NIDIN e adaptado de Picado-Santos <i>et al.</i> (2008)).	16
Figura 2.3 – Extensões de tração e compressão consideradas nos critérios de ruína.	19
Figura 2.4 – Esquema do ensaio de flexão em 4 pontos (Adaptado de Goh <i>et al.</i> (2007)).	21
Figura 2.5 – Ensaio de tração indireta (Adaptado de AASHTO (2007)).	22
Figura 2.6 – Tipo de rotura no ensaio de tração indireta (Adaptado de CEN (2003e)).	23
Figura 2.7 – Inspeção visual de rodeiras (Retirado de Pinto (2010) e de Capitão (2010)).	23
Figura 2.8 – Definição da rotura à fadiga em ensaio à flexão com controlo à extensão (Adaptado de Rowe e Bouldin (2000)).	26
Figura 2.9 – Taxa de variação da energia dissipada <i>versus</i> Número de ciclos de carga (Adaptado de Shen e Carpenter (2007)).	27
Figura 2.10 – Classificação das misturas betuminosas (Adaptado de D'Angelo <i>et al.</i> (2008)).	29
Figura 2.11 – Membros do International Technology Scanning Program (1), Equipa a inspecionar um pavimento produzido através da tecnologia WAM-FOAM (2) (Adaptado de D'Angelo <i>et al.</i> (2008)).	31
Figura 2.12 – Evolução dos testes e estudos desenvolvidos nos EUA de 2007 a 2010 (Adaptado de Dewey (2011)).	32
Figura 2.13 – Esquematização dos acontecimentos mais importantes no percurso das MBT.	32
Figura 2.14 – Esquematização dos benefícios associados à utilização de MBT.	33
Figura 2.15 – Comparação entre os níveis de gases libertados por uma MBC e uma MBT (Adaptado de Ecobit (2011)).	35
Figura 2.16 – Soma de vapores e aerossóis para diferentes classes de temperatura (Adaptado de Rühl <i>et al.</i> (2006)).	36
Figura 2.17 – Poupança energética da tecnologia Low-Energy Asphalt (Adaptado de MQP (2011)).	37
Figura 2.18 – Produtos e tecnologias de produção de MBT.	38
Figura 2.19 – Aditivo comercial Sasobit® (foto de autor – laboratório NIDIN).	39
Figura 2.20 – Resultados comparativos do ensaio <i>Wheel Tracking</i> de uma mistura aditivada com Sasobit® (Adaptado de Sasol Wax GmbH (2004)).	40
Figura 2.21 – Resultados comparativos do ensaio <i>Wheel Tracking</i> de uma mistura aditiva com Licomont Bs-100 (Adaptado de Clariant (2007)).	40
Figura 2.22 – Adição de aditivos químicos diretamente na mistura (Adaptado de González (2010)).	41
Figura 2.23 – Amostra de Rediset™ WMX (foto de autor – laboratório NIDIN).	41

Figura 2.24 – Processamento da tecnologia LEA®-Low Energy Asphalt (Adaptado de MCConnaughay (2012)).	42
Figura 3.1 – Estabilómetro do ensaio de tração indireta (laboratório NIDIN - foto de autor).	52
Figura 3.2 – Rotura do tipo a e c, respetivamente (fotos de autor).	53
Figura 3.3 – Moldagem (1) e provetes serrados (2) para o ensaio <i>Wheel Tracking</i> (fotos de autor).	54
Figura 3.4 – Pormenores do dispositivo do ensaio de flexão em 4 pontos (fotos de autor – laboratório NIDIN).	58
Figura 4.1 – Frações de agregados usados para o fabrico da mistura (fotos de autor).	67
Figura 4.2 – Esquartelador para redução das amostras (foto de autor – laboratório NIDIN).	67
Figura 4.3 – “Peneiros série base + série 2” usados na determinação da granulometria dos agregados (foto de autor – laboratório NIDIN).	68
Figura 4.4 – Determinação da massa volúmica e absorção do pó de pedra (fotos de autor).	71
Figura 4.5 – Estudo de caracterização do betume.	72
Figura 4.6 – Análise microscópica do betume de referência.	76
Figura 4.7 – Análise microscópica da amostra de PMB 45-80/65 aditivada com 2% de Sasobit®.	77
Figura 4.8 – Análise microscópica da amostra de PMB 45-80/65 aditivada com 3% de Sasobit®.	77
Figura 4.9 – Análise microscópica da amostra de PMB 45-80/65 aditivada com 4% de Sasobit®.	77
Figura 4.10 – Determinação da viscosidade dinâmica através de um viscosímetro rotacional (Adaptado de Ferreira (2009)).	78
Figura 4.11 – Estudos de compatibilidade com o aditivo Sasobit® (Adaptado de Ferreira (2009)).	83
Figura 4.12 – Fabrico da mistura (fotos de autor).	86
Figura 4.13 – Compactador de impacto (fotos de autor).	86
Figura 4.14 – Provetes compactados (fotos de autor).	86
Figura 4.15 – Determinação da máxima baridade teórica (fotos de autor).	87
Figura 4.16 – Determinação do teor de betume através do método de incineração (fotos de autor).	87
Figura 4.17 – Desmolde dos provetes (fotos de autor).	87
Figura 4.18 – Determinação da baridade dos provetes (fotos de autor).	87
Figura 4.19 – Prensa de Marshall e rebentamento de um provete (fotos de autor).	88
Figura 4.20 – Determinação da baridade dos provetes e aplicação de vácuo ao subgrupo húmido (fotos de autor).	91

Figura 4.21 – Determinação da resistência à tração indireta da MBQ e da MBT (fotos de autor). .....	92
Figura 4.22 – Tipo de rotura manifestado pelos provetes – tipo c (subgrupo seco – a e d, subgrupo húmido – b e c) (fotos de autor). .....	92
Figura 4.23 – Determinação das baridades dos provetes para o ensaio de Pista (fotos de autor). .....	93
Figura 4.24 – Equipamento do ensaio de Pista (roda de rastreamento, nível e sensor de deformação) (foto de autor – laboratório NIDIN). .....	93
Figura 4.25 – Aspeto e profundidade das rodeiras da MBQ e da MBT (fotos de autor). ..	94
 Figura 5.1 – Produção anual de misturas betuminosas em todo o mundo (Adaptado de EAPA (2007)). .....	99
 Figura C.1 – Esquema ilustrativo das medições efetuadas nas vigas para o ensaio de flexão em 4 pontos. ....	v
 Figura E.1 – Ficha técnica da brita basáltica de dimensões 10/16. ....	xxiii
Figura E.2 – Ficha técnica da brita basáltica de dimensões 8/12,5. ....	xxiv
Figura E.3 – Ficha técnica do pó de pedra calcário de dimensões 0/6. ....	xxv
Figura E.4 – Ficha técnica do fíler comercial (distribuição granulométrica). ....	xxvi
Figura E.5 – Ficha técnica do fíler comercial (restantes características). ....	xxvii
 Figura F.1 – Pó de pedra 0/4 e Brita 4/12 usados na primeira abordagem à formulação. ....	xxix
 Figura I.1 – Características básicas da amostra de PMB 45/80-65. ....	xxxviii
Figura I. 2 – Viscosidade dinâmica da amostra de PMB 45/80-65 (parte1). ....	xxxix
Figura I.3 – Viscosidade dinâmica da amostra de PMB 45/80-65 (parte2). ....	xl
Figura I.4 – Características básicas da amostra de PMB 45/80-65 com 2% de aditivo. .	xli
Figura I.5 – Viscosidade dinâmica da amostra de PMB 45/80-65 com 2% de aditivo (parte1). ....	xlII
Figura I.6 – Viscosidade dinâmica da amostra de PMB 45/80-65 com 2% de aditivo (parte2). ....	xlIII
Figura I.7 – Características básicas da amostra de PMB 45/80-65 com 3% de aditivo. ....	xlIV
Figura I.8 – Viscosidade dinâmica da amostra de PMB 45/80-65 com 3% de aditivo (parte1). ....	xlV
Figura I.9 – Viscosidade dinâmica da amostra de PMB 45/80-65 com 3% de aditivo (parte2). ....	xlVI
Figura I.10 – Características básicas e viscosidade dinâmica (parte1) da amostra de PMB 45/80-65 com 4% de aditivo. ....	xlVII
Figura I.11 – Viscosidade dinâmica da amostra de PMB 45/80-65 com 4% de aditivo (parte2). ....	xlVIII





## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 – Curvas granulométricas das frações da mistura AC 20 Base (MBAM).....	48
Gráfico 3.2 – Curva granulométrica e limites da mistura AC 20 Base (MBAM).....	49
Gráfico 3.3 – Profundidade da rodeira ao longo dos ciclos de carga para a MBQ e a MBT. ....	55
Gráfico 3.4 – Variação do módulo de rigidez ao longo do varrimento de frequências.....	56
Gráfico 3.5 – Variação do ângulo de fase ao longo do varrimento de frequências. ....	56
Gráfico 3.6 – Lei de fadiga da MBQ (Adaptado de (Cordeiro, 2012)). ....	58
Gráfico 3.7 – Lei de Fadiga da MBT.....	59
Gráfico 3.8 – Comparação da Lei de Fadiga da MBQ e da MBT.....	60
Gráfico 4.1 – Curvas granulométricas das frações da mistura AC14 Surf (BBr). ....	68
Gráfico 4.2 – Curva granulométrica e fusos limite da mistura AC14 Surf (BBr). ....	69
Gráfico 4.3 – Evolução da penetração a 25 °C. ....	74
Gráfico 4.4 – Evolução da temperatura de amolecimento. ....	74
Gráfico 4.5 – Variação da recuperação elástica do betume aditivado. ....	75
Gráfico 4.6 – Resultados da penetração retida após RTFOT. ....	76
Gráfico 4.7 – Resultados do aumento da temperatura de amolecimento após RTFOT. .	76
Gráfico 4.8 – Viscosidade cinemática da amostra de PMB 45-80/65. ....	80
Gráfico 4.9 – Viscosidade cinemática da amostra de PMB 45-80/65 com 2% de aditivo. ....	80
Gráfico 4.10 – Viscosidade cinemática da amostra de PMB 45-80/65 com 3% de aditivo. ....	81
Gráfico 4.11 – Viscosidade cinemática da amostra de PMB 45-80/65 com 4% de aditivo. ....	81
Gráfico 4.12 – Evolução das temperaturas de mistura e compactação sobre efeito das diferentes percentagens do aditivo em estudo. ....	82
Gráfico 4.13 – Porosidade dos provetes. ....	89
Gráfico 4.14 – Baridade dos provetes.....	89
Gráfico 4.15 – Força de rotura dos provetes. ....	89
Gráfico 4.16 – Deformação dos provetes. ....	89
Gráfico 4.17 – VMA dos provetes.....	89
Gráfico 4.18 – Evolução da rodeira ao longo do ensaio. ....	94
Gráfico 5.1 – Redução do consumo energético na secagem e aquecimento dos agregados de acordo com a sua percentagem de humidade à temperatura ambiente.	104
Gráfico 5.2 – Redução do consumo energético na secagem e aquecimento dos agregados de acordo com a sua percentagem de humidade à temperatura ambiente.	105
Gráfico 5.3 – Análise do custo de diferentes tipos de combustível usados para produzir uma tonelada de MBAM de forma convencional e temperada. ....	108

Gráfico 5.4 – Análise do custo de diferentes tipos de combustível usados para produzir uma tonelada de MBAM de forma convencional e temperada.....	109
Gráfico 5.5 – Quantidades de CO <sub>2</sub> emitidas na produção da MBAM de forma convencional e temperada, recorrendo a diferentes tipos de combustível.....	111
Gráfico 5.6 – Quantidades de CO <sub>2</sub> emitidas na produção do BBr de forma convencional e temperada, recorrendo a diferentes tipos de combustível. ....	111
Gráfico C.1 – Módulo de rigidez das vigas da MBQ ensaiada ao patamar de extensão 200µm.....	xiv
Gráfico C.2 – Energia dissipada das vigas da MBQ ensaiada ao patamar de extensão 200µm.....	xiv
Gráfico C.3 – Ângulo de fase das vigas da MBQ ensaiada ao patamar de extensão 200µm.....	xiv
Gráfico C.4 – Módulo de rigidez das vigas da MBQ ensaiada ao patamar de extensão 300µm.....	xv
Gráfico C.5 – Energia dissipada das vigas da MBQ ensaiada ao patamar de extensão 300µm.....	xv
Gráfico C.6 – Ângulo de fase das vigas da MBQ ensaiada ao patamar de extensão 300µm.....	xv
Gráfico C.7 – Módulo de rigidez das vigas da MBQ ensaiada ao patamar de extensão 400µm.....	xvi
Gráfico C.8 – Energia dissipada das vigas da MBQ ensaiada ao patamar de extensão 400µm.....	xvi
Gráfico C.9 – Ângulo de fase das vigas da MBQ ensaiada ao patamar de extensão 400µm.....	xvi
Gráfico C.10 – Módulo de rigidez das vigas da MBT ensaiada ao patamar de extensão 200µm.....	xviii
Gráfico C.11 – Energia dissipada das vigas da MBT ensaiada ao patamar de extensão 200µm.....	xviii
Gráfico C.12 – Ângulo de fase das vigas da MBT ensaiada ao patamar de extensão 200µm.....	xviii
Gráfico C.13 – Módulo de rigidez das vigas da MBT ensaiada ao patamar de extensão 300µm.....	xix
Gráfico C.14 – Energia dissipada das vigas da MBT ensaiada ao patamar de extensão 300µm.....	xix
Gráfico C.15 – Ângulo de fase das vigas da MBT ensaiada ao patamar de extensão 300µm.....	xix
Gráfico C.16 – Módulo de rigidez das vigas da MBT ensaiada ao patamar de extensão 400µm.....	xx
Gráfico C.17 – Energia dissipada das vigas da MBT ensaiada ao patamar de extensão 400µm.....	xx
Gráfico C.18 – Ângulo de fase das vigas da MBT ensaiada ao patamar de extensão 400µm.....	xx

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Intervalos de redução dos gases emitidos e das poeiras (D'Angelo <i>et al.</i> , 2008). .....	34
Tabela 2.2 – Níveis de emissões registadas em diferentes tipos de betumes. ....	35
Tabela 2.3 – Limites de exposição para emissões de betume (Riley, 2004). ....	36
Tabela 3.1 – Temperaturas de mistura e compactação da MBT e da MBQ. ....	48
Tabela 3.2 – Distribuição granulométrica das frações da mistura e ajuste ao fuso AC 20 Base (MBAM). ....	49
Tabela 3.3 – Características de referência do betume 10/20 produzido pela Galp®. ....	50
Tabela 3.4 – Características do betume 10/20 com 1% de aditivo (Cordeiro, 2012). ....	50
Tabela 3.5 – Determinação da Máxima Baridade Teórica da MBQ e da MBT (MBAM). ..	51
Tabela 3.6 – Resultados do ensaio de Sensibilidade à Água (MBAM). ....	53
Tabela 3.7 – Resultados comparativos do ensaio <i>Wheel Tracking</i> da MBQ e da MBT. .	54
Tabela 3.8 – Desempenho mecânico comparativo entre a MBQ (Cordeiro, 2012) e a MBT. ....	61
Tabela 4.1 – Distribuição granulométrica das frações da mistura e ajuste ao fuso AC14 Surf (BBr). ....	69
Tabela 4.2 – Massas volúmicas e absorção dos agregados. ....	71
Tabela 4.3 – Características de referência do betume PMB 45-80/65 produzido na ProbiGalp. ....	73
Tabela 4.4 – Resultados da penetração a 25 °C e da temperatura de amolecimento. ...	73
Tabela 4.5 – Resultados da recuperação elástica. ....	75
Tabela 4.6 – Resultados da penetração a 25 °C e da temperatura de amolecimento após RTFOT. ....	75
Tabela 4.7 – Temperaturas de fabrico e compactação das misturas em estudo. ....	84
Tabela 4.8 – Especificações da mistura do tipo AC14 Surf (BBr) (EP, 2009). ....	85
Tabela 4.9 – Síntese de resultados do Estudo de Marshall. ....	88
Tabela 4.10 - Determinação da Máxima Baridade Teórica da MBQ e da MBT (BBr). ....	91
Tabela 4.11 – Resultados da Sensibilidade à Água (BBr). ....	92
Tabela 4.12 – Síntese dos resultados do ensaio de Pista. ....	93
Tabela 4.13 – Síntese dos resultados obtidos para a MBQ e para a MBT. ....	95
Tabela 5.1 – Comparação entre a energia necessária para manter ou aumentar a temperatura do betume (May <i>et al.</i> , 1999). ....	101
Tabela 5.2 – Parâmetros considerados para o cálculo da energia despendida na secagem e aquecimento dos agregados da MBAM. ....	103
Tabela 5.3 – Energia despendida para produzir uma tonelada de MBAM. ....	103
Tabela 5.4 – Energia despendida para produzir uma tonelada de BBr. ....	105

Tabela 5.5 – Poder calorífico inferior (LHV) de vários tipos de energia/combustível (May <i>et al.</i> , 1999; Boundy <i>et al.</i> , 2011).	106
Tabela 5.6 – Quantidade e respetivo preço do combustível necessário para produzir uma tonelada de MBAM a quente e com redução das temperaturas de fabrico.	106
Tabela 5.7 – Custo máximo do aditivo usado no caso de estudo da MBAM.	107
Tabela 5.8 – Quantidade e respetivo preço do combustível necessário para produzir uma tonelada de BBr a quente e com redução das temperaturas de fabrico.	107
Tabela 5.9 – Custo máximo do aditivo usado no caso de estudo do BBr.	107
Tabela 5.10 – Fatores de conversão de diferentes tipos de combustível para emissões de CO <sub>2</sub> (DECC, 2010).	110
Tabela 5.11 – Emissões de CO <sub>2</sub> para o caso de estudo da MBAM.	110
Tabela 5.12 – Emissões de CO <sub>2</sub> para o caso de estudo do BBr.	111
Tabela A.1 – Dimensões médias e baridades dos provetes para o ensaio de determinação da Sensibilidade à Água.	i
Tabela A.2 – Verificação da variação de volume dos provetes do subgrupo húmido após vácuo.	i
Tabela B.1 – Dimensões das lajes do ensaio de Pista.	iii
Tabela B.2 – Baridades das lajes do ensaio de Pista.	iii
Tabela B.3 – Evolução da rodeira ao longo do ensaio de Pista.	iv
Tabela C.1 – Dimensões e baridades das vigas da MBQ (Adaptado de Cordeiro (2012)).	vii
Tabela C.2 – Dimensões e baridades das vigas da MBT.	ix
Tabela C.3 – Síntese dos resultados relativos ao varrimento de frequências da MBQ.	xi
Tabela C.4 – Síntese dos resultados relativos ao varrimento de frequências da MBT.	xi
Tabela C.5 – Síntese de resultados relativos ao ensaio de resistência à fadiga da MBQ (Adaptado de Cordeiro (2012)).	xiii
Tabela C.6 – Síntese de resultados relativos ao ensaio de resistência à fadiga da MBT.	xvii
Tabela D.1 – Requisitos da mistura do tipo AC 14 Surf (BBr), segundo o CEEP 14.03.	xxi
Tabela F.1 – Percentagens da Curva Granulométrica 1.	xxix
Tabela F.2 – Fusos granulométricos para uma mistura AC14 Surf (BBr).	xxix
Tabela F.3 – Percentagens da curva granulométrica 2.	xxx
Tabela F.4 – Percentagens da curva granulométrica 3.	xxx
Tabela F.5 – Percentagens da curva granulométrica 4.	xxxi
Tabela F.6 – Percentagens da curva granulométrica 5.	xxxi

Tabela F.7 – Percentagens da curva granulométrica 6. ....	xxxii
Tabela G.1 – Dimensões e baridades dos provetes para a determinação da Sensibilidade à Água. ....	xxxiii
Tabela G.2 – Verificação da variação de volume dos provetes do subgrupo húmido após vácuo. ....	xxxiii
Tabela H.1 – Dimensões das lajes do ensaio de Pista.....	xxxv
Tabela H.2 – Baridades das lajes do ensaio de Pista.....	xxxv
Tabela H.3 – Evolução da rodeira ao longo do ensaio de Pista. ....	xxxvi



## **SIMBOLOGIA**

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials  
AEMA – Asphalt Emulsion Manufacturers Association  
APORBET – Associação Portuguesa Fabricante de Misturas Betuminosas  
ASTM – American Society for Testing and Materials  
BMB – Betume modificado com borracha  
BBr – Betão betuminoso rugoso  
CCG – Compactador de corte giratório  
CEEP – Caderno de Encargos das Estradas de Portugal  
CRM – Crumb rubber modified  
EVA – Ethylene-Vinyl-Acetate (plastómetros)  
FHWA – Federal Highway Administration  
GEE – Gases com efeito de estufa  
HHV – Higher heating value (poder calorífico superior)  
ITSP – International Technology Scanning Program  
ITSR – Resistência conservada à tração indireta  
ITS<sub>d</sub> – Resistência à tração indireta do subgrupo seco  
ITS<sub>w</sub> – Resistência à tração indireta do subgrupo húmido  
LEA – Low-Energy Asphalt  
LEAB – Low-Energy Asphalt Concrete  
LHV – Lower heating value (poder calorífico inferior)  
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
LVDT – Linear variable differential transformer  
MB – Mistura(s) betuminosa(s)  
MBAM – Mistura(s) betuminosa(s) de alto módulo  
MBC – Mistura(s) betuminosa(s) convencional(is)  
MBQ – Mistura(s) betuminosa(s) quente(s)  
MBT – Mistura(s) betuminosa(s) temperada(s)  
NAPA – National Asphalt Pavement Association  
NCAT – National Center of Asphalt Technology  
NCHRP – National Cooperative Highway Research Program  
PAH – Polycyclic aromatic hydrocarbon (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos)  
PMB – polymer(s) modified bitumen(s)  
PDR – Proportional rut depth  
PV – Plateau Value  
RAP – Mistura asfáltica recuperada  
RD – Rut depth

RDED – Ratio of Dissipated Energy Change

RILEM – Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages

RTFOT - Rolling Thin Film Oven Test

SBS – Styrene-Butadiene-Styrene (elastómeros)

SHRP – Strategic Highway Research Program

TWG – Technical Working Group

VMA – Volume de vazios na mistura de agregados

WMA – Warm mix asphalt

WAM – Warm asphalt mix

WTS – Wheel tracking slope (Variação da deformação permanente)

WTS<sub>AIR</sub> – Variação da deformação permanente em provetes acondicionados ao ar

WTS<sub>W</sub> – Variação da deformação permanente em provetes acondicionados em água



CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

---



## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. Enquadramento Temático**

Tendo em conta que em Portugal predominam os pavimentos flexíveis e que as camadas betuminosas são essenciais para o correto comportamento destes, impõe-se a necessidade de enveredar por novas tecnologias e produtos, que visem melhorar o seu desempenho e que tragam vantagens a nível económico e ambiental.

Nesse âmbito surgiram as misturas betuminosas temperadas (MBT), que visam reduzir as temperaturas de produção e compactação, não comprometendo as características de comportamento face às misturas betuminosas convencionais (MBC). Existem já tecnologias que permitem a redução de 40 °C na temperatura de produção, reduzem as temperaturas de compactação, assegurando trabalhabilidade e uma adequada compactação, reduzem as emissões de gases de efeito de estufa (GEE), melhoram as condições de trabalho, possibilitam maiores distâncias de transporte e maiores períodos de pavimentação (Hurley e Prowell, 2006).

Para se determinar o comportamento das misturas betuminosas (MB) é necessário caracterizar os seus componentes, cujas propriedades intrínsecas as afetam. Todavia, na sua formulação atende-se sobretudo à sua composição e à proporção entre componentes (Silva, 2006).

O dimensionamento de pavimentos através do método empírico-mecanicista usa geralmente como critérios de ruína a extensão vertical de compressão, no topo da fundação, para controlar a deformação permanente e a extensão horizontal de tração, na base das camadas betuminosas, para controlar o fendilhamento por fadiga (Pais e Palha, 2010). Contudo, a formulação de MB através destas metodologias nem sempre tem a fiabilidade necessária para assegurar o desempenho mecânico desejado. Assim, desenvolveram-se métodos de formulação com base nas propriedades mecânicas fundamentais dos materiais e análises de desempenho real. Denominam-se de fundamentais ou racionais, nos quais se avaliam por meio de ensaios as propriedades das MB, nomeadamente a resistência à deformação permanente e à fadiga (Lopes, 2009).

As referidas MBT têm sido alvo de vários estudos e tentativas de validação. A dificuldade surge devido ao facto de não existirem expressões que prevejam o seu comportamento em serviço, sendo necessário medir as propriedades mecânicas.

## **1.2. Objetivos e Metodologia**

Tendo em vista a temática atual da redução das emissões de GEE e a necessidade de reduzir os consumos energéticos associados ao fabrico de misturas betuminosas surge o propósito deste estudo: avaliar a possibilidade de fabricar misturas betuminosas a temperaturas inferiores às convencionalmente praticadas, sem que o desempenho final das mesmas seja comprometido.

Em termos práticos os objetivos deste trabalho compreendem duas fases, primeiro a conclusão do trabalho de investigação anterior (Cordeiro, 2011), seguido de um novo programa experimental. A primeira parte consiste no estudo de uma mistura de alto módulo de deformabilidade (MBAM), do tipo AC 20 Base, com a incorporação de um betume aditivado. A segunda consiste no estudo de uma mistura betuminosa de desgaste, do tipo AC14 Surf (BBr), com incorporação de betume modificado com polímero aditivado. Avaliar o não comprometimento do desempenho final das misturas consistiu em caracterizá-las em termos mecânicos, com ensaios de sensibilidade à água, de resistência à deformação permanente e à fadiga.

A redução das temperaturas de fabrico e compactação foi conseguida por meio da introdução de aditivos, portanto um dos objetivos deste estudo passa também pela sua validação, ou seja, por avaliar a relação custo-benefício do seu uso.

## **1.3. Organização dos Conteúdos**

O presente trabalho divide-se em seis capítulos. O primeiro, a Introdução, compreende o Enquadramento Temático, onde se explica sucintamente a importância do tema que será desenvolvido, os Objetivos e Metodologia, onde são apresentados os principais objetivos a ser alcançados e qual a metodologia usada para o conseguir e, por fim, o presente subcapítulo, a Organização dos conteúdos.

O segundo capítulo, o Estado da Arte, faz uma revisão bibliográfica das temáticas abordadas ao longo do estudo, nomeadamente as misturas betuminosas em geral, os ensaios de caracterização dos ligantes, os ensaios de caracterização das misturas e, por fim, as misturas betuminosas temperadas: a sua história, benefícios e tecnologias de fabrico.

O terceiro capítulo corresponde à avaliação do desempenho da MBAM temperada, através da introdução do aditivo químico Rediset<sup>TM</sup>. É feita uma análise comparativa face à mistura betuminosa padrão, produzida a quente.

O quarto capítulo inclui o estudo de formulação e desempenho comparativo de um betão betuminoso rugoso (BBr) para camada de desgaste. A mistura betuminosa temperada

foi produzida através da introdução do aditivo orgânico Sasobit<sup>®</sup>, tendo sido feito um estudo de interação ligante-aditivo e uma otimização das temperaturas de fabrico e compactação.

O quinto capítulo desta dissertação corresponde à análise custo-benefício da aplicação dos aditivos estudados. É feita a determinação da redução do consumo energético, obtido através da redução das temperaturas de aquecimento dos agregados e do ligante, valores que se reverterão em termos económicos e de impacte ambiental. É feita também uma análise da consequente redução de emissões de CO<sub>2</sub>.

O sexto capítulo inclui as conclusões e considerações finais, bem como as possibilidades de trabalhos futuros.



## CAPÍTULO 2

### ESTADO DA ARTE

---





## **2. ESTADO DA ARTE**

### **2.1. Misturas Betuminosas**

Os pavimentos rodoviários devem responder a duas exigências, a funcional e a estrutural, por um lado devem assegurar segurança e conforto, por outro suportar as cargas aplicadas pelos veículos. Os pavimentos flexíveis são constituídos na parte superior pelas camadas aglutinadas, as misturas betuminosas (MB), e pelas camadas granulares, na parte inferior. O seu comportamento varia de acordo com as suas características, que inclui o número de camadas, a sua espessura e a sua constituição, as ações de tráfego e climáticas e ainda a qualidade do solo de fundação (Mendes, 2011; Picado-Santos *et al.*, 2008).

Na execução das camadas superiores dos pavimentos betuminosos, nas mais nobres, aplicam-se MB constituídas por materiais granulares doseados de forma volumétrica ou ponderal, que são misturados a uma quantidade pré-determinada de aglutinante. As MB devem responder às exigências de estabilidade, resistência à fadiga, durabilidade, flexibilidade, impermeabilidade, aderência e trabalhabilidade (FHWA, 1982). Cada uma destas exigências depende de determinadas propriedades das variáveis da MB, que influenciam o seu desempenho.

#### **2.1.1. Metodologias de Formulação**

As metodologias de formulação das MB pretendem conseguir a mais correta proporção de componentes, de modo a garantirem um bom desempenho em serviço. Interessa destacar as vantagens e os pontos fracos de cada uma.

#### **Métodos por “Receita”/Especificações**

Até meados do século XX esta foi a metodologia de formulação, da qual surgiram resultados positivos devido à experiência acumulada (Silva, 2006). Através das ditas receitas estabelece-se a curva granulométrica, a classe de penetração do betume, a espessura das camadas e por fim a composição final da mistura, fixando quais as características que esta deve manifestar durante a produção e a colocação em obra. Nenhuma destas etapas é sujeita a ensaios laboratoriais com provetes (Pais *et al.*, 2001). Esta metodologia não permite futuras inovações.

#### **Métodos Empíricos**

Os métodos empíricos foram a primeira evolução das “Especificações”, sendo o método de Marshall o mais conhecido (Silva, 2006; Pais *et al.*, 2001). Neste tipo de formulação determina-se o teor de betume, de modo a que este controle as variáveis de deformação

máxima e força de rotura, com base na experiência acumulada, como os limites de porosidade e de volume de vazios na mistura de agregados (VMA) (Pais *et al.*, 2001; Picado-Santos *et al.*, 2008). Estes métodos baseiam-se na representação aproximada do comportamento esperado. As grandezas não se avaliam com base no comportamento mecânico do material formulado, reproduzem-se laboratorialmente provetes imitando, nem sempre fidedignamente, as condições de aplicação em obra (Pais *et al.*, 2001). Esta metodologia não recorre a ensaios de caracterização mecânica, não avaliando a qualidade da MB *in situ*, havendo por isso o risco desta não respeitar as especificações (Lopes, 2009). Esta metodologia peca por usar procedimentos desajustados para simular o comportamento dos materiais.

### **Métodos Analíticos**

Estes métodos permitem o cálculo volumétrico da composição da MB, que inclui curva granulométrica, teor ótimo de betume e volume de vazios. Usam modelos de previsão das características mecânicas, baseando-se em procedimentos analíticos com base nas relações volumétricas entre componentes (Pais *et al.*, 2001; Silva, 2006). Comparações entre os resultados analíticos e ensaios *in situ* demonstram a aproximação à realidade das fórmulas. É adequada mas não obrigatória, a confirmação através da produção de provetes (Silva, 2006). Estes métodos não garantem a solução, tendo em conta que as misturas têm de assegurar um nível que depende não só das condições de fabrico e compactação, como posteriormente das condições de serviço.

### **Métodos Volumétricos**

Nestes métodos, através da análise dos volumes parcelares da mistura, ou seja, agregados, betume e vazios, chega-se à percentagem de betume e granulometria dos agregados a serem usados na MB. Esta determinação faz-se através de um compactador de corte giratório (CCG), o qual consegue determinar a compacidade e o volume de vazios consoante a espessura das camadas *in situ* (Pais *et al.*, 2001). Utilizam-se provetes compactados em laboratório, devendo estes obedecer a algumas exigências (Silva, 2006). As metodologias volumétricas garantem resultados superiores aos dos métodos empíricos, todavia não contemplam procedimentos que traduzam o comportamento das MB em serviço.

### **Métodos Racionais**

Estes métodos designam-se também por métodos relacionados com o comportamento e surgem no seguimento dos métodos volumétricos. Consistem na produção de provetes de MB de acordo com a metodologia volumétrica, que são depois sujeitos a ensaios

mecânicos (fundamentais ou de simulação), para determinar as propriedades que asseguram o correto comportamento mecânico do pavimento. Destacam-se o módulo de rigidez, resistência à fadiga e resistência à deformação permanente (Lopes, 2009; Pais *et al.*, 2001; Silva, 2006).

Ensaio de simulação são o CCG, que tenta simular o estado de tensão durante a produção e aplicação da MB e o ensaio de Pista (*Wheel Tracking*), que simula a passagem repetida dos rodados. Ensaio fundamentais, que visam avaliar o comportamento mecânico, são o ensaio de compressão diametral, com aplicação repetida de cargas, e o de fluência (Duarte, 2010; Pais *et al.*, 2001).

### **Métodos Baseados no Comportamento Mecânico**

Faltam ainda referir os métodos baseados no comportamento das misturas betuminosas que, baseando-se nas propriedades da MB, medidas em ensaios laboratoriais e em modelos teóricos de previsão de comportamento, procuram antever o comportamento das MB em serviço, assim como a sua degradação, consoante determinada estrutura de pavimento, condições de tráfego e temperatura. Nestes métodos usam-se MB otimizadas por uma das metodologias referidas, que são avaliadas através de ensaios fundamentais e de simulação, sendo esses dados depois introduzidos num sistema informático de avaliação integrado, que prevê o comportamento da mistura *in situ*, em condições reais de serviço. Este tipo de *software* faz a interação entre os dados de formulação da mistura com os de dimensionamento do pavimento onde esta será empregue, permitindo concluir se a MB poderá ser aceite (Duarte, 2010).

#### **2.1.2. Ligantes**

Na indústria da pavimentação utilizam-se ligantes hidráulicos e ligantes betuminosos, sendo os últimos de maior interesse na produção de misturas betuminosas flexíveis e para a presente investigação.

Percentualmente o ligante é a menor parcela da MB porém, é essencial para garantir as características gerais de qualidade. À junção do ligante com o agregado fino, designado por fíler, dá-se o nome de mástique, componente responsável por aglutinar e recobrir o restante agregado da mistura betuminosa (Santos, 2011). A análise e caracterização do comportamento dos ligantes são imprescindíveis para se apurar o desempenho da mistura betuminosa.

Dentro dos betumes naturais existe o asfalto natural, encontrado em lagos e a rocha asfáltica, que surge por impregnação de maciços sob a ação de agentes geológicos. Existe o alcatrão, um líquido preto e viscoso, resultante do processo de destilação

destrutivo, na ausência de ar (pirólise), de matéria orgânica, como madeira, hulha ou carvão (Picado-Santos *et al.*, 2008).

O betume, que ocupa entre 10 a 15% do volume da MB, pode ser proveniente de um dos quatro tipos de aglutinantes (Silva, 2006):

- a) Betume asfáltico/puro;
- b) Betume modificado;
- c) Betume fluidificado (*cut-back*);
- d) Emulsão betuminosa.

### **Betumes Puros ou Asfálticos**

O betume puro resulta da destilação direta ou fracionada do petróleo bruto, apresenta-se como um material de cor negra, viscoso, impermeável à água, adesivo e de consistência que varia consoante a temperatura, sendo à temperatura ambiente quase sólido. É composto por hidrocarbonetos de elevado peso molecular, ou seja, é uma das frações mais pesadas do petróleo, logo, obtido perto da base da torre de destilação. A sua destilação ocorre normalmente a uma temperatura de cerca de 480 °C (FHWA, 1982).

A composição química dos betumes asfálticos divide-se essencialmente em asfaltenos e maltenos, o último subdivide-se em aromáticos, resinas e saturados. Os betumes puros são geralmente definidos como um sistema coloidal, ou seja, uma dispersão de micelas de elevado peso molecular, os asfaltenos, num meio dispersante de peso molecular inferior, os maltenos. Quanto mais elevada a sua percentagem de asfaltenos maior é a dureza do betume, menor a sua penetração e, por conseguinte, a viscosidade e o ponto de amolecimento são mais elevados. O aumento da temperatura causa a quebra das ligações entre hidrogénios, permitindo a redução da viscosidade.

Os aromáticos são o constituinte com peso molecular mais baixo, são cadeias de carbono não polares, com capacidade de dissolver moléculas hidrocarbonatadas de elevado peso molecular. Quanto maior a concentração de resinas no betume maior será a sua aderência aos agregados, devido a terem elevada polaridade. Os saturados são óleos viscosos não polares de cadeia de hidrocarbonetos asfálticos, solúveis em heptano normal.

A reologia dos betumes puros depende das variáveis tempo de carregamento e temperatura. Basicamente, a temperaturas de serviço baixas e tempo de carregamento curto, o betume apresenta um comportamento linear, na gama intermédia destas variáveis apresenta um comportamento viscoelástico e quando a temperatura de serviço e tempo de carregamento são elevados o betume manifesta um comportamento viscoso.

Portanto, é necessário definir as características dos betumes para que estes respeitem os parâmetros estabelecidos nas especificações aplicáveis, só assim o seu comportamento poderá ser antevisto (Picado-Santos *et al.*, 2008; Santos, 2011).

### **Emulsões Betuminosas**

São um sistema heterogéneo de duas fases líquidas imiscíveis, que se mantêm estável devido à ação química do emulsionante. A função deste elemento é envolver os glóbulos de betume de forma a reduzir a tensão superficial entre estes e a água, ou seja, garante que as finas partículas de betume se mantenham estáveis, em suspensão, sobre o meio aquoso (Silva, 2006). A ação do agente emulsionante evita que, com o passar do tempo, os líquidos imiscíveis se voltem a reagrupar (Pereira, 2010).

Na indústria da pavimentação rodoviária usam-se essencialmente as emulsões aniónicas, ideais para o tempo seco e agregados calcários, e as catiónicas, aplicáveis para qualquer tipo de agregado e em tempo seco ou húmido, exceto na presença de precipitação (Read *et al.*, 2003; Picado-Santos *et al.*, 2008). Depois do espalhamento da emulsão ocorre a sua rotura, permitindo que os glóbulos de betume se reúnam novamente, readquirindo a viscosidade normal enquanto a água se infiltra e/ou evapora (Silva, 2006).

### **Betumes Fluidificados (*Cut-Back*)**

Estes betumes obtêm-se a partir da adição de um agente fluidificador, um dissolvente volátil, ao betume asfáltico, de modo a reduzir temporariamente a viscosidade à temperatura ambiente. Após a aplicação da MB o fluidificante evapora-se e o betume recupera a sua viscosidade natural. Atualmente este ligante caiu em desuso devido a ser pouco económico e a libertar gases poluentes quando aplicado (Silva, 2006; Picado-Santos *et al.*, 2008).

Consoante o tipo de fluidificador conseguem-se diferentes velocidades de volatilização (cura). Os dissolventes comuns são o gasóleo, o petróleo e a gasolina, que apresentam uma cura lenta, média e rápida, respetivamente.

### **Betumes Modificados**

O betume é responsável pelo comportamento viscoelástico da MB, fulcral para o seu correto desempenho em serviço, sobretudo no que diz respeito à resistência à deformação permanente e à resistência à fadiga. Assim, criaram-se formas de melhorar as características mecânicas e reológicas deste (Read *et al.*, 2003; Pereira, 2010).

Os betumes referidos nas três últimas secções podem ser alterados por adição de aditivos – agentes que visam melhorar as características dos betumes, para melhorar o desempenho das MB em serviço. Podem ser feitas modificações com aditivos de promoção da adesividade, fílers melhorados, antioxidantes, componentes argonometálicos, enxofre; com polímeros como elastómeros – SBS, plastómetros – EVA, borracha recuperada, fibras, resinas e endurecedores e através de reações químicas (Silva, 2006).

Os polímeros termoendurecíveis melhoram a resistência do betume à temperatura, tornando-o elástico, isento de fluência e resistente a ataques químicos, porém diminuem o tempo de cura. Os elastómeros reduzem a penetração a 25 °C e aumentam o ponto de amolecimento do betume, face ao betume convencional, tornam o betume mais flexível, demonstrando maior resistência à deformação permanente. Os plastómetros provocam um aumento da viscosidade do betume à temperatura ambiente, ainda que não aumentem a sua elasticidade. Aumentam também a resistência à deformação permanente em serviço, sendo muito utilizados para facilitar a pavimentação em tempo frio. Os betumes modificados com elastómeros ou com plastómetros apresentam dificuldade de armazenamento porque existe o risco de separação do betume e do modificador, a solução poderá passar pela adição de enxofre.

A incorporação de borracha reciclada nas misturas betuminosas (BMB) ou *Crumb Rubber Modified* (CRM) melhora as suas características mecânicas: maior flexibilidade e elasticidade, maior resistência à fadiga e à deformação plástica, menor suscetibilidade às ações climáticas, nomeadamente às variações de temperatura, aumento de adesividade, de coesão interna e de resistência ao envelhecimento (Vicente, 2006). Quando a borracha é aplicada diretamente no betume (*wet-process*) a MB será mais homogênea do que se a borracha for introduzida no processo de mistura com os agregados (*dry-process*), todavia a segunda opção é mais económica (Picado-Santos *et al.*, 2008).

As fibras, minerais ou orgânicas, aplicadas ao betume asfáltico criam uma ligação física, fixam uma considerável quantidade de ligante sem haver risco de fluência devido à sua superfície e à quantidade de interface e reforçam a ligação do mástique devido à sua geometria alongada, condição que se traduz em aumento de resistência mecânica da MB (Picado-Santos *et al.*, 2008).

A adição de enxofre permite reduzir a viscosidade a altas temperaturas, melhorando a trabalhabilidade da MB. A redução de viscosidade torna a mistura virtualmente autocompactável, sendo possível realizar-se a compactação sem recurso a cilindros de rolos. Após compactação gera-se atrito entre as partículas da mistura, tornando-a mais

resistente à deformação permanente. O senão da aplicação de enxofre é a libertação de sulfureto de hidrogénio depois dos 150 °C (Read *et al.*, 2003).

Para a caracterização dos betumes modificados usam-se os mesmos ensaios que são aplicáveis à caracterização dos betumes puros, contudo esses métodos têm sofrido melhoramentos (Silva, 2006).

## **2.2. Caracterização de Betumes**

A validação dos betumes é obrigatória e imprescindível para garantir que a MB irá funcionar com o comportamento esperado em serviço. Esta verificação/validação está estabelecida em normas como a ASTM (American Society for Testing and Materials), AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), as europeias e APORBET (Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas) (Silva, 2006).

A maioria dos métodos marca limites de aceitabilidade dos resultados obtidos, define limites para os resultados obtidos por um único investigador, estabelecendo a repetibilidade e define limites para diferentes investigadores em diferentes laboratórios, estabelecendo assim a reprodutibilidade do produto em questão (Read *et al.*, 2003).

As duas propriedades fundamentais para avaliar a viscosidade do betume são os ensaios de penetração a 25 °C e o ensaio da temperatura de amolecimento, ambos avaliados empiricamente (Picado-Santos *et al.*, 2008). As especificações LNEC E 80 definem as propriedades e os métodos de ensaio ao betume para que este esteja conforme.

### **2.2.1. Penetração a 25°C**

O teste de penetração é usado desde o século XIX para caracterizar a consistência do betume (Read *et al.*, 2003). A Norma Europeia EN 1426 – *Determination of needle penetration* estabelece os parâmetros para a determinação da penetração a 25 °C, que mede indiretamente a viscosidade do betume. A consistência do betume é inversamente proporcional ao valor de penetração obtido a partir deste ensaio, ou seja, quanto maior o valor menor será a consistência (Barrão, 2011; CEN, 2007b).

Neste ensaio (Figura 2.1) mede-se a profundidade, em décimos de milímetros, de penetração de uma agulha, de dimensões padronizadas, com uma carga vertical de 100 g, sobre uma amostra de betume à temperatura de 25 °C, durante 5 segundos. O procedimento descrito aplica-se para penetrações até 330×0,1 mm. Para penetrações até 500×0,1 mm a temperatura de ensaio reduz-se para 15 °C, mantendo-se as restantes condições de ensaio (CEN, 2007b).

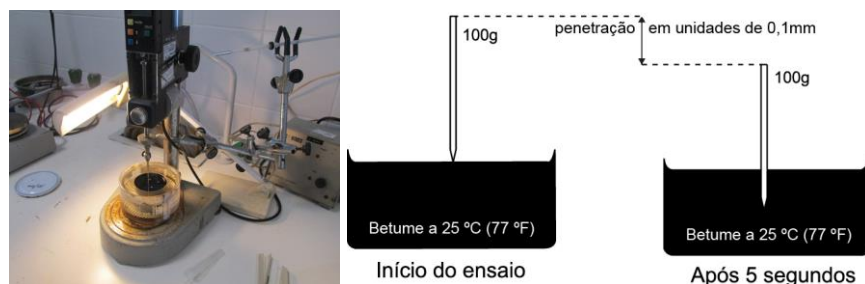


Figura 2.1 – Penetrómetro e procedimento do teste de penetração a 25 °C (foto de autor – laboratório NIDIN e adaptado de FHWA (1982)).

### 2.2.2. Temperatura de Amolecimento

A temperatura de amolecimento (Método Anel e Bola) permite classificar o comportamento do betume a temperaturas elevadas. A Norma Europeia EN 1427 – *Determination of the softening point - Ring and Ball method* estabelece os parâmetros para a sua determinação, num intervalo de temperaturas de 28 °C até 150 °C (CEN, 2007d).

Neste ensaio (Figura 2.2) determina-se a temperatura à qual a amostra de betume, submetida a um aquecimento progressivo e ao peso da esfera, atinge uma determinada consistência (Silva, 2006; Barrão, 2011). Dois provetes de betume são colocados em anéis de latão, que são posteriormente colocados num banho, sujeitos ao aumento da temperatura de 5 °C por minuto. À medida que a esfera de aço se vai afundando o betume transborda do anel, quando atinge a profundidade de  $(25 \pm 4)$  mm o ensaio termina e regista-se a temperatura do líquido. O resultado é a média das temperaturas registadas nos dois provetes ensaiados.

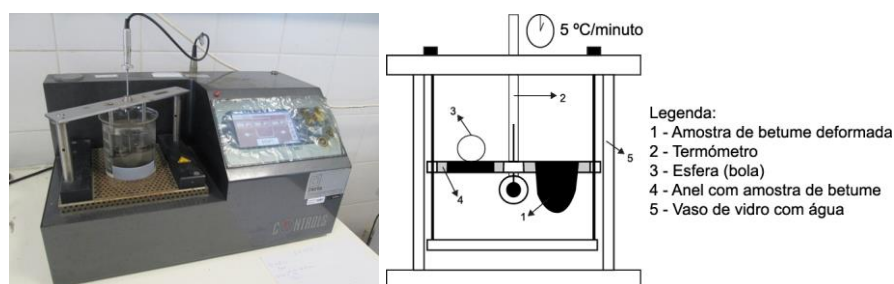


Figura 2.2 – Esquematização e equipamento do ensaio da temperatura de amolecimento (foto de autor – laboratório NIDIN e adaptado de Picado-Santos *et al.* (2008)).

### 2.2.3. Viscosidade Cinemática

A viscosidade é uma característica fundamental para determinar a forma como o betume se comporta a determinada temperatura e num intervalo de valores (Read *et al.*, 2003). Esta grandeza quantifica a resistência ao movimento dos betumes, a qual se traduz pela relação entre a tensão e a taxa de corte (CEN, 2007a). A Norma Europeia EN 12595 –



*Determination of kinematic viscosity* estabelece os parâmetros para a sua determinação. Esta norma considera a viscosidade para temperaturas de 60 °C e 135 °C, num intervalo de 6mm<sup>2</sup>/s a 300000 mm<sup>2</sup>/s, que correspondem à temperatura máxima de serviço e à temperatura média de produção e aplicação de uma MB, respetivamente (FHWA, 1982).

O ensaio consiste em medir o tempo, em segundos, que uma amostra de betume demora a escoar através de um orifício, para encher um frasco até à marca dos 60 ml (Barrão, 2011). Durante o procedimento deve manter-se a temperatura do banho constante, num limite de (±0,3) °C para os 60 °C e de (±0,5) °C para os 135 °C. Determina-se a viscosidade a partir da Equação 2.1, onde  $c$  é a constante de calibração do viscosímetro, em mm<sup>2</sup>/s e  $t$  o tempo medido em s. O valor da viscosidade resulta da média de três valores de ensaio válidos (CEN, 2007a).

$$v = c \times t$$

Equação 2.1

Expressa-se em m<sup>2</sup>/s (unidade SI) ou em mm<sup>2</sup>/s (casos práticos). Relaciona-se com a viscosidade dinâmica através da Equação 2.2, a qual se expressa em Pa.s.

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

Equação 2.2

Onde:

$\mu$  – Viscosidade dinâmica (Pa.s ou kg/m.s);

$\rho$  - Massa específica (kg/m<sup>3</sup>).

#### **2.2.4. RTFOT – Determinação da Resistência ao Envelhecimento**

Este procedimento permite expor o betume a condições próximas às de produção em central. Os ensaios feitos após o envelhecimento, de penetração e de temperatura de amolecimento, permitem prever qual será o endurecimento que este sofrerá na produção e aplicação (FHWA, 1982). A Norma Europeia EN 12607 (Parte1) – *Determination of the resistance to hardening under the influence of heat and air* estabelece os parâmetros para a simulação do envelhecimento, por aquecimento e exposição ao ar do betume (CEN, 2007c).

Os efeitos da combinação atrás referida causam variação de massa do provete ensaiado, expressa em percentagem, assim como altera os valores de penetração a 25°C, de temperatura de amolecimento e de viscosidade.

### **2.2.5. Recuperação Elástica**

A avaliação da recuperação elástica adequa-se essencialmente a betumes modificados com elastómeros termoplásticos, sendo um ensaio fundamental na gama dos PMB's (*polymer modified bitumens*).

A Norma Europeia EN 13398 – *Determination of the elastic recovery of modified bitumen* estabelece que uma amostra seja esticada, num banho a 25 °C, a uma taxa constante de 50 mm/min, até um alongamento de 200 mm, a qual é posteriormente cortada ao meio. Decorridos 30 minutos medem-se as distâncias de encurtamento. A recuperação elástica pode definir-se como a percentagem de alongamento do comprimento da amostra (CEN, 2003a).

### **2.2.6. Estabilidade ao Armazenamento**

Através deste ensaio pretende-se determinar se os betumes e ligantes betuminosos são estáveis ao armazenamento a temperaturas elevadas. A Norma Europeia EN 13399 – *Storage Stability* define os procedimentos deste ensaio. Segundo esta deve-se introduzir uma amostra homogénea de betume dentro de um tubo de alumínio, mantido na vertical, numa estufa a  $(180 \pm 5)$  °C ou à temperatura especificada pelo fabricante durante  $(72 \pm 1)$  h. Terminado esse período, remove-se o betume do interior do tubo e corta-se em três partes, com o objetivo de analisar as possíveis diferenças entre a parte superior e inferior. Essas duas partes são ensaiadas de forma a determinar a variação de massa, de penetração e de temperatura de amolecimento (CEN, 2003b).

## **2.3. Ensaios de Caracterização de Misturas Betuminosas**

O dimensionamento empírico-mecanicista dos pavimentos é feito com base nos critérios de ruína (Figura 2.3) que se dividem no critério de fadiga, ou seja, fendilhamento excessivo nas zonas mais tracionadas das camadas betuminosas, controlado portanto pela extensão de tração ( $\varepsilon_t$ ), na base de camada betuminosa e no critério de deformação permanente, ou seja, assentamento excessivo da camada superficial do pavimento, controlado pela extensão vertical de compressão ( $\varepsilon_{dp}$ ) do topo do leito de pavimento (Picado-Santos *et al.*, 2008). É perceptível que o fendilhamento e a formação de rodeiras são as principais degradações, às quais se juntam a desagregação da camada de desgaste e o movimento dos materiais constituintes. O seu aparecimento à superfície do pavimento resulta de diferentes contribuições do solo de fundação, das camadas granulares e das camadas betuminosas (Pereira e Miranda, 1999).

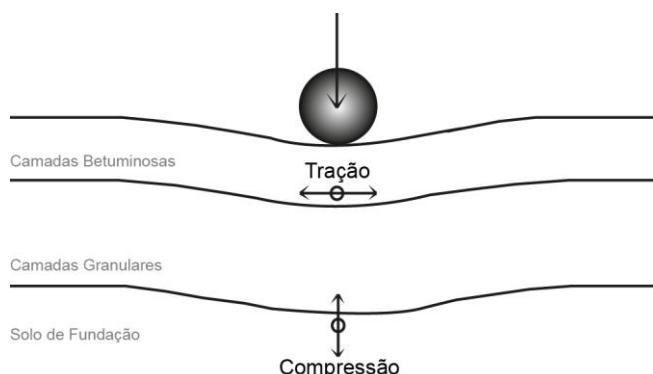


Figura 2.3 – Extensões de tração e compressão consideradas nos critérios de ruína.

Ao contrário das MBC, as MBT implicam determinação experimental das suas propriedades mecânicas, porque não se dispõe de expressões que prevejam o seu comportamento mecânico (Capitão *et al.*, 2004). As metodologias racionais consideram a avaliação do comportamento mecânico em serviço a partir de ensaios fundamentais e/ou de simulação, ao contrário das metodologias empírico-mecanicistas que utilizam critérios desajustados para simular o comportamento mecânico das misturas, baseando-se no comportamento esperado.

Os ensaios fundamentais e de simulação tentam reproduzir parâmetros como estado de tensão e deformação, durante as passagens repetidas dos rodados sob a ação da temperatura em condições *in situ*, questões como o nível de compactação e os períodos de repouso e carregamento também são levados em conta (Silva, 2006).

A Norma Europeia EN 12697: Bituminous mixtures – *Test Methods for Hot Mix Asphalt* estabelece os parâmetros para a avaliação das várias características de uma MB. Destacam-se a máxima baridade teórica, o módulo de rigidez, a resistência à deformação permanente e à fadiga e a sensibilidade à água.

Apesar das solicitações aos pavimentos serem muito variáveis, é necessário simplificar as condições *in situ* para definir quais as avaliações a serem feitas. Como já foi referido, o fendilhamento resultante das repetidas passagens do tráfego que geram tensões de tração horizontais e as deformações permanentes resultantes da compressão vertical que gera redução de volume e esforços de corte são as degradações que colocam mais em causa o correto desempenho das misturas betuminosas (Silva, 2006).

### 2.3.1. Máxima Baridade Teórica

A determinação da Máxima Baridade Teórica ( $\rho_{mv}$ ) é essencial, pois a partir desta determina-se o volume de vazios da mistura (VMA), característica que influencia o comportamento da mistura. A sua determinação é feita com base na Norma Europeia EN 12697-5: *Determination of the maximum density*, podendo ser determinada através

de métodos volumétricos (1), hidrostáticos (2) e por meio de cálculo (3). Os procedimentos 1 e 2 determinam  $\rho_{mv}$  através do volume da amostra sem vazios e da sua massa seca. O procedimento 3 determina  $\rho_{mv}$  a partir da sua composição (percentagem de ligante e agregados) e das densidades dos componentes da MB. No processo volumétrico determina-se o volume da amostra através do deslocamento de água ou um solvente pelo provete num picnómetro. No processo hidrostático determina-se o volume da amostra através da sua massa seca e depois imersa em água (CEN, 2002).

### **2.3.2. Módulo de Rigidez**

Em termos estruturais as misturas betuminosas são caracterizadas com base no módulo de rigidez, no ângulo de fase e no coeficiente de Poisson. O módulo de rigidez depende da temperatura e do período de carregamento, que está relacionado com velocidade de circulação dos veículos. É elevado para baixas temperaturas e períodos de carregamento curtos e reduzido para temperatura altas e períodos de carregamento longos, ou seja, permite prever o comportamento da mistura à deformação permanente. Quando um pavimento é solicitado o material deforma-se em resposta. Essa deformação pode ser definida por uma lei que considera a mesma frequência, mas que apresenta um desfasamento em relação à carga, ao qual se chama ângulo de fase. O coeficiente de Poisson é menos relevante no comportamento das MB variando apenas com a temperatura, entre 0,3 para baixas e 0,5 para altas, sendo correto optar por um valor intermédio (Capitão *et al.*, 2004; Silva, 2006).

A determinação do módulo de rigidez pode ser feita através de ensaios de tração ou compressão uniaxial, ensaios de corte, ensaios de flexão e ensaios de tração indireta. Alguns autores (Palha *et al.*, 2009) conduziram uma avaliação do módulo de rigidez na qual concluíram que através do ensaio de tração indireta se conseguem obter resultados equivalentes ao ensaio de flexão em 4 pontos, demonstrando a sua fiabilidade.

A Norma Europeia que define os parâmetros para a sua determinação é a EN 12697-26: *Stiffness*, na qual se compilam as metodologias de carregamento repetidos. Estes testes tentam reproduzir fidedignamente as tensões que se instalam devido às repetidas passagens dos rodados, podendo ser usadas amostras produzidas laboratorialmente ou resultantes de carotagem das camadas de pavimento.

Destaca-se o teste de flexão em 4 pontos (Figura 2.4), estabelecido no Anexo B da referida norma, que indica como deve ser calculado o módulo de rigidez ensaiando provetes prismáticos. A estes é imposta flexão periódica, sendo-lhes permitida rotação e translação horizontal livres, em todos os pontos de carga e reação, para que não se gerem tensões adicionais. O deslocamento periódico aplicado ao provete é sinusoidal e

simétrico face ao ponto zero. A amplitude deslocamento deve ser constante em função do tempo. Ao longo do ensaio a força que impõe a deformação é medida em função do tempo, assim como o ângulo de fase (CEN, 2004b).

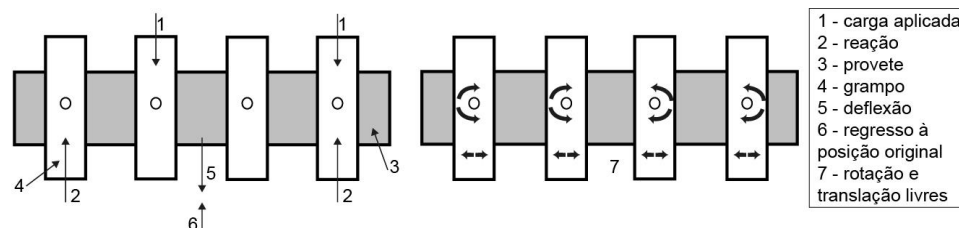


Figura 2.4 – Esquema do ensaio de flexão em 4 pontos (Adaptado de Goh *et al.* (2007)).

A amplitude e a frequência de carregamento devem ser controlados em função da força ou do deslocamento, ou seja, é imposta uma força sinusoidal para conseguir atingir uma determinada amplitude de deformação ou é estabelecida a força a aplicar e determina-se a amplitude de deformação que esta gera.

Nas amostras produzidas laboratorialmente deverão ser seguidos os procedimentos indicados na EN 12697-33, nas amostras extraídas de pavimentos, as mesmas deverão ter uma espessura no mínimo de 60 mm. As suas dimensões e massas são medidas com base na EN 12697-29. Após o período de estágio de duas a oito semanas, os provetes antes de ensaiados deverão ser acondicionados no mínimo durante uma hora e no máximo durante seis horas, a uma temperatura de 20 °C.

A gama de frequências de ensaio pode variar entre 0,1 e 50 Hz, sendo no final repetida a frequência de 0,1 Hz para verificar que o varrimento não danificou a amostra. Se depois de repetida essa frequência se verificar que o módulo de rigidez medido inicialmente para a mesma não difere mais 3% dá-se o ensaio por terminado. O módulo de rigidez inicial deve ser medido com base nos valores obtidos entre 45 ° e o 100 ° ciclos, mas normalmente considera-se o valor obtido no centésimo ciclo para garantir que a amplitude e deformação já são constantes.

### 2.3.3. Sensibilidade à Água

Vários autores desenvolveram desde 1920 ensaios que intentam estabelecer o potencial dos pavimentos betuminosos para sofrerem danos sobre ação da humidade. Os primeiros testes pretendiam determinar o efeito da água sobre a coesão ligante-agregado. Nas décadas de 60 e 70 admitiu-se a necessidade de simular as condições de campo em laboratório, surgindo técnicas como a saturação por vácuo, a aplicação de pressão cíclica nos poros das misturas, o congelamento da água e o acondicionamento em água quente (Solaimanian *et al.*, 2003).

Geralmente os ensaios de sensibilidade à água dividem-se naqueles que fornecem uma avaliação qualitativa e naqueles que fornecem informação quantitativa através de um parâmetro, antes e depois de expostos a acondicionamento, que pretende simular o efeito da presença de humidade no pavimento (Solaimanian *et al.*, 2003). O ensaio de tração indireta traduz a sensibilidade à água através do valor de resistência obtido, incluindo-se assim no segundo grupo, atrás referido. A primeira aproximação a esta metodologia foi feita por Lottman (1978), na Universidade de Idaho, na década de 70, na qual este autor simulava o efeito da humidade expondo os provetes a 18 ciclos térmicos (Lottman, 1978). O método de ensaio padrão ASSHTO T283 - *Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage* veio complementar a primeira aproximação, estabelecendo um mínimo de 80% para o rácio entre resistência à tração indireta dos provetos expostos a acondicionamento em meio húmido e os secos (Figura 2.5).

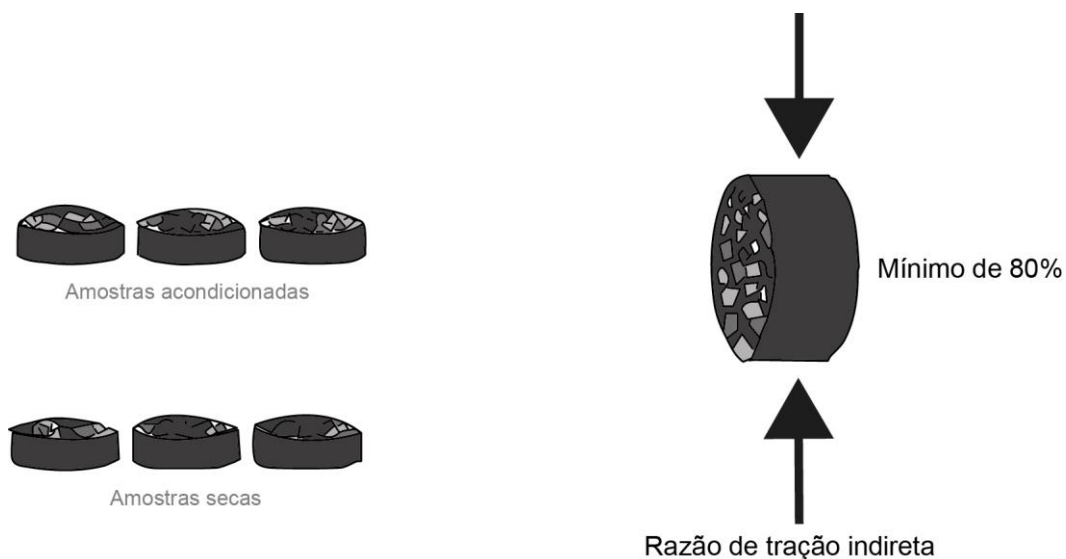


Figura 2.5 – Ensaio de tração indireta (Adaptado de AASHTO (2007)).

A nível europeu existe a Norma EN 12697-12: *Determination of the water sensitivity of bituminous specimens* que define os parâmetros para determinar a sensibilidade de uma MB através do efeito que a saturação e condicionamento em água provocam na resistência à tração indireta de provetes cilíndricos de misturas betuminosas.

Neste ensaio os provetes são sujeitos a uma carga diametral no sentido do eixo do cilindro, com uma velocidade de deslocamento  $(50 \pm 2)$  mm/min constante, até atingirem a rotura, de acordo com a Norma Europeia EN 12697-23: *Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens*. A sensibilidade à água da amostra traduz-se pelo cociente entre a média de resistência do subgrupo húmido em relação ao seco (Equação 2.3).

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} \times 100$$

Equação 2.3

Sendo ITSR a resistência conservada à tração indireta em %,  $ITS_w$  a resistência à tração indireta do subgrupo húmido, em kPa, e  $ITS_d$  a resistência à tração indireta do subgrupo seco, também em kPa. A resistência à tração indireta (ITS) de cada provete é determinada de acordo com o ponto 9 da referida norma (CEN, 2003d).

Após se ensaiar cada um dos provetes deve ser registado o tipo de rotura que este sofreu, de acordo com as tipologias ilustradas na Figura 2.6. O tipo a) é “rotura bem definida” - modelo de rotura bem definida ao longo da linha diametral do provete, exceto nas secções triangulares próximas das faixas de aplicação de carga, o tipo b) é “deformação não definida” - amostras sem uma linha de rotura evidente e o tipo c) é “combinação” - amostras com linha de rotura limitada pelas áreas onde a carga atua.

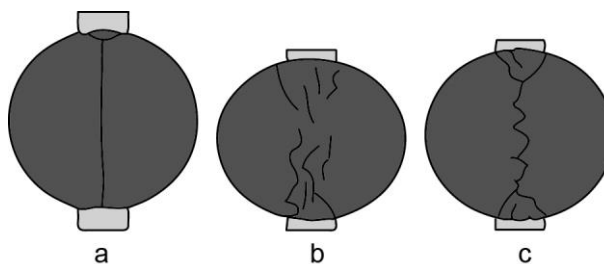


Figura 2.6 – Tipo de rotura no ensaio de tração indireta (Adaptado de CEN (2003e)).

#### 2.3.4. Resistência à Deformação Permanente

A principal manifestação de deformações permanentes dos pavimentos rodoviários flexíveis resulta da aplicação de carga repetidas, que provocam depressões transversais que se desenvolvem longitudinalmente, na zona onde os veículos circulam, formando as denominadas rodeiras (Pais *et al.*, 2000). Esta patologia (Figura 2.7) é pouco profunda se a contribuição for apenas das camadas betuminosas, tornando-se mais profunda quando as camadas granulares e até o solo de fundação contribuem para a deformação (Pais *et al.*, 2000). Consoante a configuração que a rodeira apresenta à superfície é possível extrapolar qual ou quais as camadas de pavimento que contribuíram para a sua formação.



Figura 2.7 – Inspeção visual de rodeiras (Retirado de Pinto (2010) e de Capitão (2010)).

As misturas betuminosas, depois de aplicadas, sofrem gradualmente uma redução de porosidade, por compactação. Ocorre também diminuição do volume de vazios e rearranjo do esqueleto sólido, fatores que contribuem para a deformação permanente (Pais *et al.*, 2000; Silva, 2006). Após este período de densificação, as MB sofrem deformação permanente devido aos esforços de corte impostos pelos veículos no pavimento.

O principal fator que afeta o comportamento da MB à deformação permanente é a temperatura, quanto mais elevada for menor é a resistência da mistura, por isso é conveniente que se analise a resistência à deformação permanente à máxima temperatura de serviço a que o pavimento estará exposto.

A Norma Europeia EN 12697-22: *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Wheel Tracking* estabelece os parâmetros para determinar a resistência da mistura betuminosa à deformação permanente. O ensaio preconizado nesta norma denomina-se por ensaio de Pista (*Wheel Tracking*), o qual permite determinar a suscetibilidade que uma mistura betuminosa tem em se deformar sob passagem repetida dos rodados. Essa suscetibilidade avalia-se pela profundidade da rodeira que se forma após a passagem repetida de uma roda que transmite carga a uma temperatura constante. O ensaio consiste em colocar os provetes numa mesa que lhe impõe um movimento repetitivo, provocando a formação de rodeiras.

Para esta medição existem os *large-size devices* (1) e os *extra large-size devices* (2), onde os provetes são acondicionados ao ar, e os *small-size devices* (3) que incluem os procedimentos A e B, onde os provetes são acondicionados ao ar ou em água.

Cada um destes dispositivos exige diferentes parâmetros de ensaio. Para o dispositivo 1 e 2 o teste termina quando se completou o número de ciclos de carga definidos ou quando os sulcos excederam uma profundidade de 18 mm ou 20 mm, respetivamente. Para o dispositivo 3, se for no procedimento A termina no centésimo ciclo de carga ou até a profundidade de 15 mm ser alcançada, consoante o mais rápido, enquanto o procedimento B termina ao 10000º ciclo de carga ou até a profundidade 20 mm ser alcançada, também consoante o mais rápido. A determinação da variação de deformação permanente também difere consoante o dispositivo. Para os procedimentos B acondicionados ao ar ou em água determinam-se de igual forma, segundo a Equação 2.4, onde  $WTS_{AIR}$  e  $WTS_W$  são respetivamente a variação de deformação permanente em mm por 1000 ciclos de carga e  $d_{10000}$  e  $d_{5000}$  são a profundidades dos sulcos após 10000 e 5000 ciclos (CEN, 2003c).

$$WTS_{AIR ou W} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5}$$



A variação de deformação de uma MB ensaiada através deste procedimento corresponde à média de WTS de dois provetes.

### **2.3.5. Resistência à Fadiga**

A resistência à fadiga é a capacidade que a MB tem de resistir a esforços de flexão repetidos sem atingir rotura, definindo-se pela relação entre tensão, extensão inicial e número de repetições que levaram à ruína (Pais *et al.*, 2000). Esta verifica-se quando o valor máximo da tensão instalada em cada aplicação de carga é inferior à tensão de rotura da MB para um único carregamento (Silva, 2006).

Esta resistência é afetada por variáveis da MB como granulometria, teor e rigidez do betume e grau de compactação. Este estado de ruína manifesta-se através do aparecimento de fendilhamento na zona de passagem dos rodados, que se vai propagando desde as camadas betuminosas até à superfície (Silva, 2006).

Vários estudos e desenvolvimentos têm sido feitos ao longo dos anos, no sentido de melhorar os procedimentos de ensaios e os próprios equipamentos usados.

Na campanha interlaboratorial de ensaios *Performance testing and evaluation of bituminous materials*, organizada pelo RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages*) foi possível concluir que a vida à fadiga é significativamente afetada pelo método de ensaio adotado (Coni *et al.*, 2008).

Para se considerar o fendilhamento no dimensionamento de pavimentos realizam-se ensaios mecânicos cíclicos de simulação da passagem dos veículos pesados, de modo a determinar a resistência à fadiga (Pais e Palha, 2010).

Rap Tangella *et al.* (1990) realizaram um estudo para avaliar e recomendar o método de ensaio mais adequado para definir a resposta à fadiga dos materiais betuminosos. O ensaio de flexão repetida foi aquele que obteve melhores resultados, usando o princípio da flexão simples.

As duas principais normalizações que preconizam os parâmetros para determinar a vida à fadiga são a Norma Americana AASHTO T 321-03 e a Norma Europeia EN 12697-24: *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Resistance to fatigue*. Esta determinação pode ser feita através de ensaios de flexão e de tração direta e indireta.

O carregamento imposto nestes ensaios pode ser aplicado com variação sinusoidal no tempo, ou através de outro tipo de impulso, em tensão ou extensão controlados. Se for

em tensão controlada a amplitude permanece constante durante a variação de carga, ou seja, a deformação aumentará consoante a rigidez do material diminua, se for em extensão controlada (Figura 2.8), o deslocamento mantém-se constante durante a variação de carga, ou seja, a tensão diminuirá à medida que a rigidez do material também diminui (Pais *et al.*, 2000).

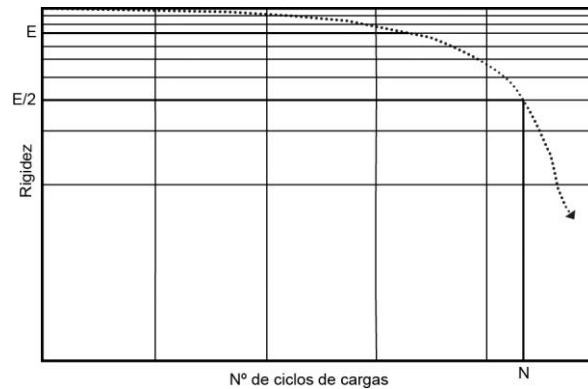


Figura 2.8 – Definição da rotura à fadiga em ensaio à flexão com controlo à extensão (Adaptado de Rowe e Bouldin (2000)).

Inicialmente alguns autores entendiam que, sendo o controlo feito à tensão, a rotura ocorria apenas quando a amostra fraturava completamente, mais tarde considerou-se que, com o intuito de proteger o equipamento de ensaio, deveria existir um limite prático para a rotura, nomeadamente a redução de 90% da rigidez inicial, mais tarde chegou-se à conclusão, mantida atualmente, de que a rotura acontece quando a rigidez inicial se reduz para metade (Coni *et al.*, 2008; Rowe, 1993). Carpenter e Ghuzlan (2000) usaram um critério de rotura com base na variação da energia dissipada ( $\Delta E$ ) entre dois ciclos consecutivos.

Com o ensaio realizado com tensão controlada a vida à fadiga é expressa pela relação entre o número de ciclos de carga até à rotura e o nível de tensão aplicado, de acordo com a Equação 2.5.

$$N_f = a \times \left( \frac{1}{\sigma_t} \right)^b$$

Equação 2.5

Sendo  $a$  e  $b$  constantes determinadas laboratorialmente.

Num dos estudos realizados pelo Strategic Highway Research Program (SHRP) concluiu-se que a resistência à fadiga é melhor caracterizada através de ensaios com controlo à extensão, segundo a Equação 2.6 (Rao Tangella *et al.*, 1990).

$$N_f = a \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^b$$

Equação 2.6

Mais uma vez,  $a$  e  $b$  são constantes determinadas em laboratório.

Neste mesmo programa de estudos conclui-se que os ensaios de fadiga com provetes trapezoidais, mais usados na Europa, e os ensaios de flexão em 4 pontos com provetes prismáticos, mais usados nos EUA, fornecem resultados equivalentes (Rowe e Bouldin, 2000).

As standardizações indicam que devem ser usadas 18 amostras, testadas em três níveis de distintos de extensão, 6 em cada um deles. Para o nível de extensão mais baixo, o ensaio de uma viga é conduzido até cerca de um milhão de ciclos de carga, podendo demorar um dia a ser realizado, portanto para concluir os dois níveis restantes podem ser necessárias de duas semanas a um mês.

Shen e Carpenter (2007), para contrariar este entrave, apresentaram uma metodologia que usa ensaios de curta duração, onde a rotura não é atingida. Esta baseia-se na taxa de variação da energia dissipada (RDED – *Ratio of Dissipated Energy Change*) para a definição do valor patamar (PV – *Plateau Value*) que se correlaciona com a vida à fadiga.

No Figura 2.9 encontra-se a curva “RDEC versus Nº de ciclos de carga”, a qual pode ser dividida em três fases. Após a fase I, onde a taxa de variação da energia dissipada diminui, atinge-se o PV (fase II), onde uma percentagem constante de energia se traduz em dano na amostra. Este período em termos reais corresponde à maioria do tempo de vida útil de um pavimento. Na fase III ocorre um aumento drástico da RDEC, equivale ao momento em que o pavimento entra em ruína, dá-se a rotura por fadiga (Pais *et al.*, 2009).

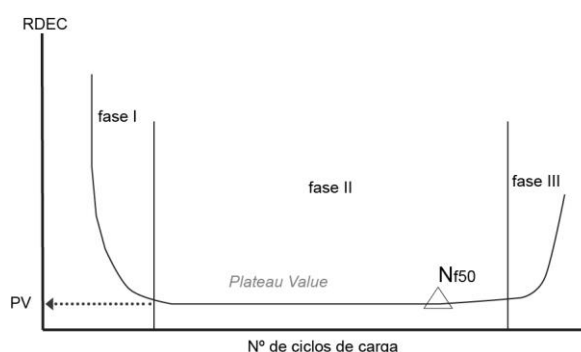


Figura 2.9 – Taxa de variação da energia dissipada versus Número de ciclos de carga (Adaptado de Shen e Carpenter (2007)).

O valor de RDEC no ponto  $N_{f50}$ , correspondente à redução de 50% do valor de rigidez inicial, é definido como o *Plateau Value*, tal como indicado na Figura 2.9.

Pais *et al.* (2009) desenvolveram um estudo sobre o método de PV, chegando à conclusão que a sua aplicação implica dificuldades, sobretudo no nível de extensão mais baixo, onde a energia dissipada é praticamente constante.

Contudo, é importante referir que estes ensaios podem requerer dias ou até semanas, sendo necessário vários ensaios para se conseguir uma lei de fadiga. Impõe-se a necessidade de procurar outros métodos de análise (Pais e Palha, 2010; CEN, 2004a).

## 2.4. Misturas Betuminosas Temperadas

Estados Unidos, Canadá e alguns países europeus têm testado tecnologias (produtos e processos) que visam reduzir as temperaturas de produção e compactação das misturas betuminosas a quente, sem comprometer o seu desempenho final. Estes tipos de misturas designam-se por misturas betuminosas temperadas (WMA – *warm mix asphalt* ou MBT). O seu benefício imediato é a redução do gasto energético nos queimadores, face às misturas betuminosas convencionais (MBC) (AASHTO *et al.*, 2008; Silva *et al.*, 2010). É um ganho significativo porque 30 a 50% dos gastos totais numa central são atribuídos ao combustível (Hurley e Prowell, 2006).

A redução energética implicará diminuição das emissões de GEE, redução dos fumos nocivos libertados nas centrais de produção e aumento da qualidade e saúde no trabalho (Silva *et al.*, 2010). Emissões mais baixas poderão permitir o deslocamento das centrais para pontos mais próximos dos locais de obra, encurtando as distâncias de transporte. Para além disto, as MBT permitem maiores distâncias de transporte e maiores períodos de pavimentação, aplicação em tempo fresco e melhoria da compactação (D'Angelo *et al.*, 2008; Silva *et al.*, 2010).

Estatísticas mostram reduções de 60 a 70% de óxidos de azoto, 50% de compósitos orgânicos, 30 a 40% de  $\text{CO}_2$  e de  $\text{SO}_2$ , 20 a 25% de poeiras e 10 a 30% de monóxido de carbono. Admite-se que quanto maior a redução de temperatura maior será a redução de emissões de gases (D'Angelo *et al.*, 2008). A percentagem de redução de temperatura de produção e compactação depende do tipo de tecnologia usada na produção da MB, mas poderá atingir os 40 °C (Silva *et al.*, 2009).

Na Figura 2.10 definem-se as várias classificações das MB consoante a temperatura de produção, ilustram-se também os níveis de combustível gasto e a quantidade de emissões de  $\text{CO}_2$ , de acordo com o tipo de mistura. As MBC produzem-se a temperaturas entre 140 e 160 °C, as quais garantem a secagem dos agregados de modo a que o betume os aglutine totalmente, além disso ainda asseguram a

trabalhabilidade na fase de colocação e compactação (Silva *et al.*, 2010). As tecnologias das MBT permitem a redução da viscosidade do ligante garantindo que os agregados sejam completamente revestidos, a temperaturas inferiores (D'Angelo *et al.*, 2008).

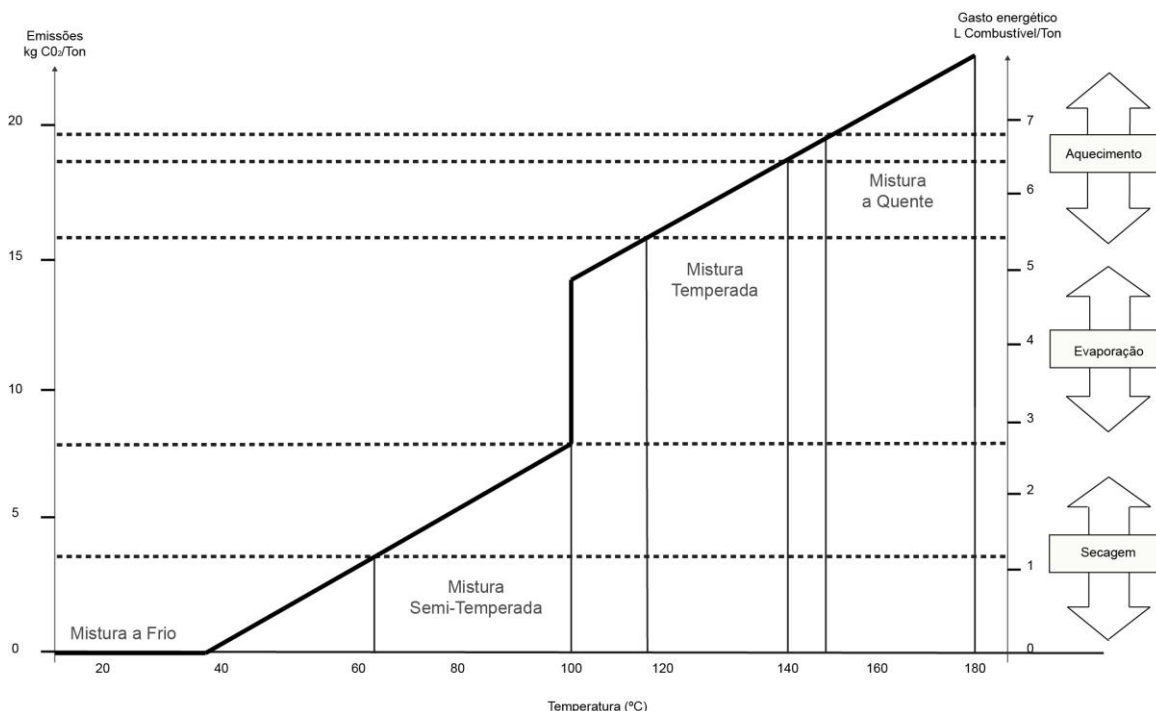


Figura 2.10 – Classificação das misturas betuminosas (Adaptado de D'Angelo *et al.* (2008)).

Estas tecnologias vêm a ser desenvolvidas desde 1990, embora o primeiro provete só tenha sido produzido em 2004, nos EUA (NAPA, 2008). Precisamente em 1990, nos EUA, foi criado o programa ITSP (*The International Technology Scanning Program*) que visa avaliar as tecnologias desenvolvidas neste campo. Em 2007 uma equipa responsável pelo programa visitou países como a Alemanha, Bélgica, França e Noruega para analisar os seus avanços. Os objetivos do ITSP são controlar a investigação destas tecnologias, para serem postas em prática de modo eficiente, pretende-se também evitar estudos similares em diferentes países, desperdiçando tempo e fundos (D'Angelo *et al.*, 2008).

Os estudos que vêm a ser desenvolvidos demonstram que as MBT são uma alternativa viável e fiável às MBC. Já se tendo verificado que não comprometem o habitual comportamento em serviço e que por vezes ainda melhoram características mecânicas, impõe-se a necessidade de criar um sistema de aprovação que tem de se basear em ensaios laboratoriais de desempenho, complementados por ensaios de campo (D'Angelo *et al.*, 2008). Estas tecnologias implicam melhores condições de armazenamento para evitar problemas com humidade e ajuste dos queimadores das

centrais às temperaturas mais baixas, porque existe o risco de contaminação da MB com combustível.

#### **2.4.1. História das Misturas Betuminosas Temperadas**

Segundo Kristjansdottir (2006) as misturas betuminosas produzidas a temperaturas mais baixas cedo surgiram, pela mão do professor Ladis Csanyi, da universidade de Iowa, em 1956, o qual desenvolveu uma mistura betuminosa com introdução de espuma, dando o primeiro passo no campo das tecnologias de formação de espuma. Em 1968, a Mobil Oil na Austrália adquiriu a patente da criação de Csanyi, modificando o processo através da introdução de água fria, em vez da injeção de vapor de água (Muthen, 1998).

Em 1977, 1979 e 1981 foi publicado o manual “Bitumuls Mix Manual”, o manual da Federal Highway Administration (FHWA) e o manual do Asphalt Emulsion Manufacturers Association (AEMA), respetivamente, que trouxeram as primeiras premissas sobre as novas tecnologias (Ferreira, 2009).

Anos depois, em 1994, Maccarone desenvolveu um estudo sobre misturas betuminosas a frio, com base em espuma de betume e emulsões com alto teor de ligante, onde constatou que, embora este tipo de misturas não emitisse hidrocarbonetos e consumisse bastante menos combustível que as convencionais, o seu desempenho final ficava aquém do desejável (Maccarrone *et al.*, 1999).

Cinco anos mais tarde, Jenkins *et al.* (1999) apresentaram um estudo sobre misturas betuminosas semi-temperadas, onde exploraram os benefícios de aquecer os agregados a uma temperatura superior à ambiente, mas inferior ao ponto de ebulição da água, 100 °C, antes da aplicação do betume. Verificaram que esta metodologia permite o correto envolvimento dos agregados pelo ligante.

Embora os primeiros relatórios de pesquisa sobre MBT tenham surgido na década de 90 na Europa, apenas por volta do ano 2000 é que Europa e Austrália viraram definitivamente as suas atenções para estas novas tecnologias. Nesse mesmo ano, as WAM (*warm asphalt mixes*) foram mostradas ao mundo no 1º Congresso Internacional de Pavimentos Asfálticos, em Sidney (Kristjansdottir, 2006).

Koenders *et al.* (2000), no 2º Congresso do Eurasphalt e Eurobitumen, apresentaram um estudo desenvolvido em laboratório e trecho experimental de fabrico e aplicação de misturas betuminosas temperadas para camadas de desgaste densas. Neste trabalho foi abordada a questão de ser necessário garantir uma viscosidade do ligante suficientemente baixa para que este fosse capaz de envolver devidamente os agregados que eram aquecidos a temperaturas inferiores ao habitual. Este trabalho resultou no

aperfeiçoamento da tecnologia WAM-FOAM, a qual, em 1995, foi patenteada pela Shell Bitumen (Zaumanis, 2010).

Em 2002, o National Asphalt Pavement Association (NAPA) levou as MBT para os EUA. Anos depois, essa instituição conjuntamente com a FHWA formaram o Technical Working Group (TWG), cuja missão era avaliar e validar a aplicação destas misturas e implementar medidas pró-ativas. Dois anos depois, Devivere *et al.* (2004) relataram os primeiros resultados relativos à aplicação de zeolites sintéticos (Aspha-min) para a produção de espuma de betume. Segundo este estudo a água libertada pelos minerais permite a expansão do betume e, por conseguinte, o envolvimento dos agregados e a trabalhabilidade adequada.

Várias instituições, nomeadamente o NCAT (National Center of Asphalt Technology), publicaram estudos sobre vários produtos e tecnologias para o fabrico de MBT, como o Sasobit®, uma cera sintética, e o Aspha-Min (Kristjansdottir, 2006).

A criação do International Technology Scanning Program, em 2007, fruto da cooperação entre a FHWA, a AASHTO e a NCHRP (National Cooperative Highway Research Program), teve como objetivo a avaliação dos benefícios que as MBT poderiam ter para a rede rodoviária americana. Um conjunto de 13 especialistas (Figura 2.11) dirigiu-se a quatro países europeus com o objetivo de conhecer todos os avanços das novas tecnologias até à data (D'Angelo *et al.*, 2008).



Figura 2.11 – Membros do International Technology Scanning Program (1), Equipa a inspecionar um pavimento produzido através da tecnologia WAM-FOAM (2) (Adaptado de D'Angelo *et al.* (2008)).

Depois de constatadas as vantagens ambientais, sociais e económicas das MBT o seu desenvolvimento despoletou. A Figura 2.12 ilustra a evolução dos testes e demonstrações deste tipo de misturas, que se alastrou pela grande maioria dos estados americanos. Quase todos acabaram por adotar especificações permissivas para as MBT (Dewey, 2011).

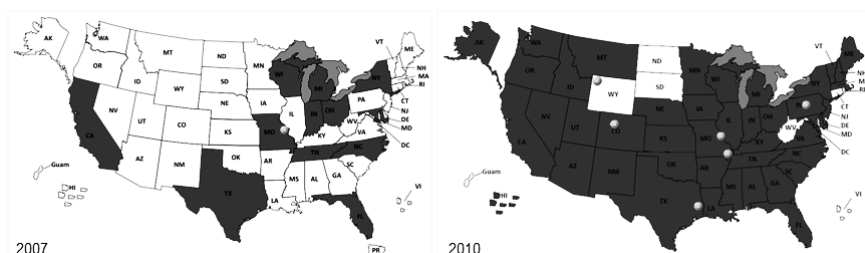


Figura 2.12 – Evolução dos testes e estudos desenvolvidos nos EUA de 2007 a 2010 (Adaptado de Dewey (2011))

A Figura 2.13 esquematiza, cronologicamente, alguns dos principais acontecimentos da história das MBT.

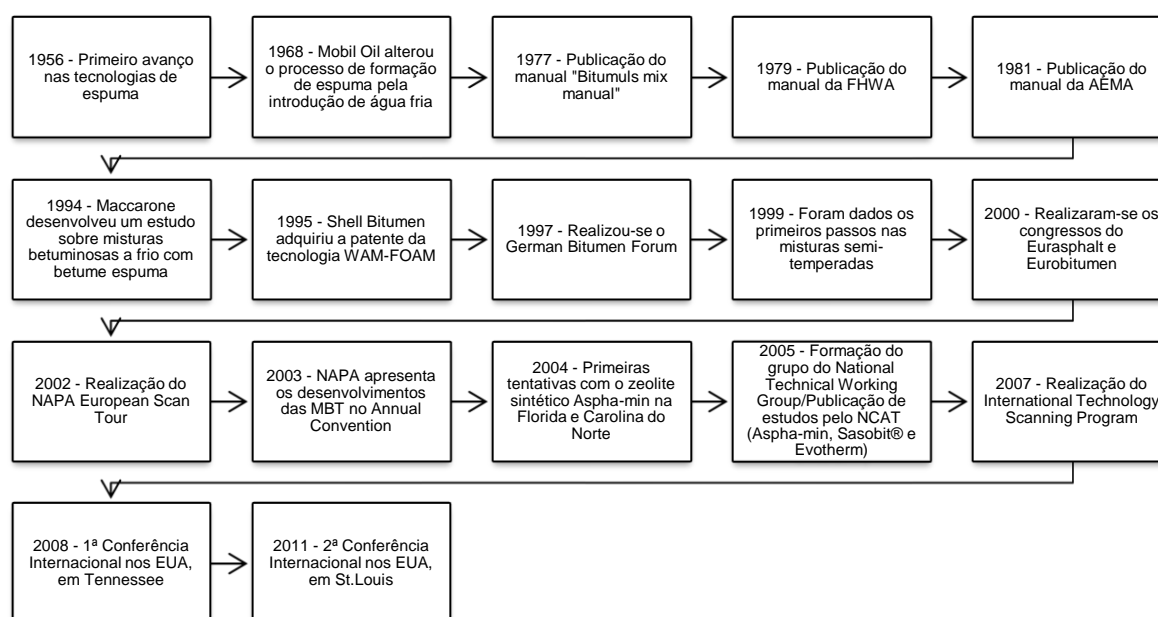


Figura 2.13 – Esquematização dos acontecimentos mais importantes no percurso das MBT.

Apesar de estar instalada uma crise económico-financeira em Portugal, na Europa e no Mundo, continuam a desenvolver-se produtos e tecnologias que visam proteger o meio ambiente e conduzir a um desenvolvimento sustentável. As vias de comunicação, nomeadamente as rodovias, funcionam como um fator de globalização, contribuindo para a estabilidade política, económica e social, contudo o seu rápido crescimento acarretou graves consequências ambientais.

As preocupações ambientais cedo surgiram. Em 1988, em Toronto, no Canadá, aconteceu a primeira reunião entre governantes e cientistas sobre as mudanças climáticas, na qual se afirmou que o seu impacto é apenas inferior ao da Guerra Nuclear. Nove anos mais tarde, em 1997, em Kyoto, no Japão, foi assinado o Protocolo de Kyoto, o qual contém um acordo vinculante que compromete os países



desenvolvidos a reduções quantificadas das suas emissões de GEE, entrando em vigor a 16 de Fevereiro de 2005 (Greenpeace, 2000). Na medida em que foram os países desenvolvidos que ao longo de anos de crescimento e industrialização contribuíram para os atuais níveis de emissões de GEE, foi sobre estes que recaiu o “fardo mais pesado”. Uma das características deste Protocolo é a introdução de diferentes metas, para diferentes países, sob o princípio de “responsabilidades comuns, mas diferenciadas”. Durante o primeiro período, de 2008 a 2012, o conjunto de países comprometeu-se a reduzir 5% face aos níveis de 1990 e no segundo período, de 2013 a 2020, o compromisso foi a redução de 18% face aos níveis de 1990 (The German BITUMEN Forum, 2006).

As centrais de produção de misturas betuminosas contribuem em grande número para os níveis de gases lançados para a atmosfera. As MBT vêm dar resposta à necessidade urgente de travar a crescente poluição, de modo a se estabelecer um crescimento sustentável. Todavia, questões verdes, na maioria das vezes, são incapazes de motivar os responsáveis, sobrando os benefícios de produção e aplicação, os económicos e até os sociais.

Os benefícios da aplicação das MBT podem ser agrupados em quatro categorias: ambientais, económicos, de fabrico e pavimentação e sociais (Figura 2.14) (EAPA, 2010).

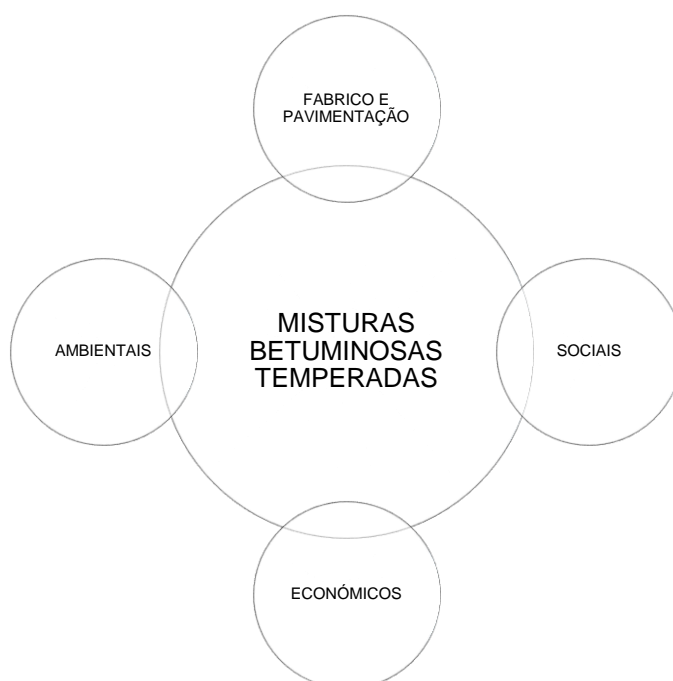


Figura 2.14 – Esquematização dos benefícios associados à utilização de MBT.

Estes benefícios não são estanques, existindo relação entre eles. Os principais benefícios ambientais são a redução de emissões de CO<sub>2</sub> e de outros gases que provocam efeito de estufa, assim como da libertação de fumos, odores e poeiras. Este último benefício é igualmente social, na medida em que esta redução implica melhoria das condições de trabalho nas centrais e mesmo no local de obra, aquando da pavimentação e compactação. Obviamente, se as condições de trabalho melhoram, a produtividade irá aumentar, o que se manifestará a nível económico.

As MBT possibilitam a incorporação de maiores quantidades de mistura asfáltica recuperada (RAP), o que conduz a menores gastos de recursos naturais, quer agregados, quer ligante. Para aliviar as preocupações relacionadas com a secagem incompleta dos agregados, os novos agregados são superaquecidos de forma a compensar a quantidade de RAP que é adicionada à temperatura ambiente.

Através de dados obtidos nos diferentes países, foi possível sintetizar os intervalos percentuais de redução dos vários gases e poeira registados com a aplicação das MBT (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Intervalos de redução dos gases emitidos e das poeiras (D'Angelo *et al.*, 2008).

<b>Intervalos de Redução dos Gases Emitidos e das Poeiras</b>				
Emissão	França	Holanda	Itália	Noruega
CO <sub>2</sub>	23	15-30	30-40	31,5
SO <sub>2</sub>	18	NA	35	NA
VOC	19	NA	50	NA
CO	NA	NA	10-30	28,5
NO <sub>x</sub>	18 <sup>a)</sup>	NA	60-70	61,5
Poeiras	NA	NA	25-55	54

<sup>a)</sup> Valor relativo a NO<sub>2</sub>/NA – dado não disponível

Os benefícios sociais são, como já foi previamente indicado, a redução de poeiras, permitindo mais conforto, segurança, no geral melhores condições de trabalho (Figura 2.15). Existem ainda outros benefícios sociais intrínsecos, nomeadamente, a possibilidade das centrais se localizarem mais próximas das zonas habitacionais, já que os níveis de poluição reduzem, o que permitirá reduzir o fluxo de movimentos pendulares.

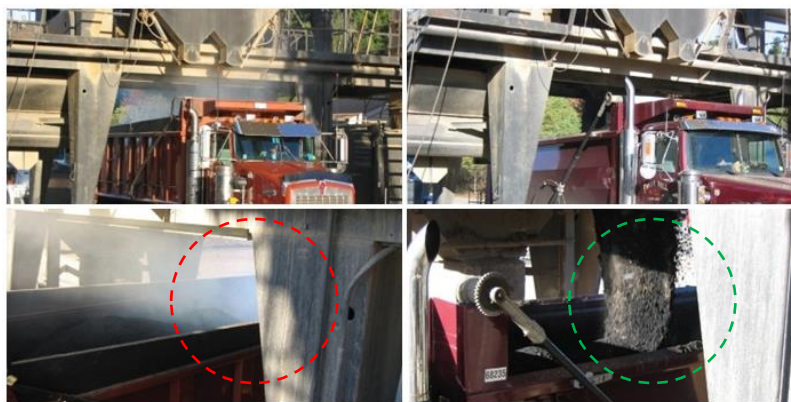


Figura 2.15 – Comparação entre os níveis de gases libertados por uma MBC e uma MBT  
(Adaptado de Ecobit (2011)).

Na Alemanha foram realizados vários estudos de modo a quantificar os níveis de exposição aos vapores e aerossóis dos trabalhos com ligantes betuminosos, assim como os possíveis riscos inerentes. Um dos quais serviu para avaliar os valores percentuais de exposição em cada uma das fases de manuseamento, tendo-se verificado que os maiores números surgem na produção da mistura em central e na sua colocação em obra, quer o processo seja manual ou mecânico (The German BITUMEN Forum, 2006).

Nos debates sobre os riscos que advêm da exposição o principal enfoque recai sobre as pequenas quantidades emitidas de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH's), porque são possivelmente cancerígenos para os humanos quando a exposição é prolongada. Na Tabela 2.2 encontram-se as percentagens de PAH's que existem em cada tipo de betume comercializado na Alemanha e, respetivamente, as quantidades que são emitidas a 180°C (The German BITUMEN Forum, 2006).

Tabela 2.2 – Níveis de emissões registadas em diferentes tipos de betumes.

Níveis de Emissões Registadas para Diferentes Tipos de Betumes			
Tipo de Betume	EPA-PAH (mg/kg)	Emissões	
		Total (mg/h)	EPA-PAH (µg/h)
H90/100	30,0	6,6	26,9
30/45	29,8	13,0	22,7
50/70	26,7	2,2	3,7
70/100	25,6	3,5	17,0
160/220	32,1	7,0	25,1
85/25	52,2	25,1	52,9
95/35	93,5	37,2	79,0

Neste estudo concluiu-se que a temperaturas abaixo de 80°C não ocorrem praticamente nenhuma emissões, mesmo a 150°C ocorrem apenas emissões de 1 mg/h. Só a temperaturas iguais ou superiores a 180°C é que se verificam emissões significativas.

A temperatura a que o betume é processado tem muita influência sobre os níveis de exposição, como demonstrado na Figura 2.16 através da soma de vapores e aerossóis para diferentes classes de temperatura.

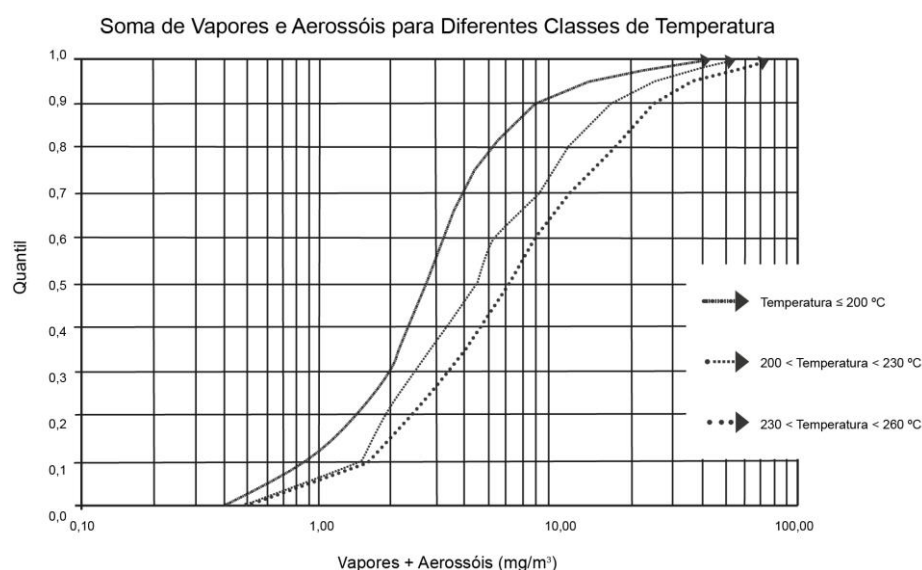


Figura 2.16 – Soma de vapores e aerossóis para diferentes classes de temperatura (Adaptado de Rühl *et al.* (2006)).

Cada país apresenta diferentes valores limites de emissões de gases, vapores, poeira e aerossóis (Tabela 2.3). Neste campo existe a necessidade de criar valores e critérios mais homogêneos, de modo a serem comparáveis, contudo esses limites terão sempre variações de acordo com o nível de desenvolvimento económico do país, assim como da localização da central (Rühl *et al.*, 2006; EAPA, 2007).

Tabela 2.3 – Limites de exposição para emissões de betume (Riley, 2004).

Limites de Exposição para Emissões de Betume		
País	Valor limite (mg/m <sup>3</sup> )	Parâmetro de medição
África do Sul	5 (8h <sup>b)</sup> )	Total de partículas
Alemanha	10 (8h <sup>b)</sup> )	Concentração de hidrocarbonetos total
Austrália	5 (8h <sup>b)</sup> )	Total de partículas
Finlândia	10 (8h <sup>b)</sup> )	Total de partículas
França	10 ((8h <sup>b)</sup> )	-
Irlanda	0,5 (8h <sup>b)</sup> )	Benzeno extraível (partículas inaláveis)
UK	5 (8h <sup>b)</sup> )	Total de partículas
USA	0,5 (8h <sup>b)</sup> )	Benzeno extraível (partículas inaláveis)
USA	5 (15min <sup>c)</sup> )	Total de partículas

<sup>b)</sup> Tempo médio esperado (normalmente durante um turno de trabalho de 8h) <sup>c)</sup> Limite de exposição de curta duração

Os benefícios económicos são o balanço entre os ganhos e os, por vezes, necessários investimentos, a ser feitos para produzir as MBT. Os gastos energéticos diminuem porque a produção da mistura a temperaturas mais baixas implica menos combustível consumido na secagem e no aquecimento dos agregados, da mesma forma, menor temperatura de fabrico significa menos desgaste dos equipamentos das centrais. Todavia, existem os gastos, se necessários, do investimento e depreciação das modificações das centrais, da compra dos aditivos e do licenciamento das novas tecnologias (EAPA, 2010).

Estudos indicam que a produção de MBT em alternativa às MBC se traduz numa poupança de 20 a 35% em combustível, podendo estas percentagens ser ainda maiores com o ajuste dos queimadores à produção a temperaturas mais reduzidas. Alguns processos, como o Low-Energy Asphalt (LEA) (Figura 2.17) e a Low-Energy Asphalt Concrete (LEAB), entre outros com produção de microespuma, nos quais os agregados não são aquecidos a temperaturas superiores ao ponto de ebulição da água, podem atingir poupanças na ordem dos 50% (D'Angelo *et al.*, 2008).

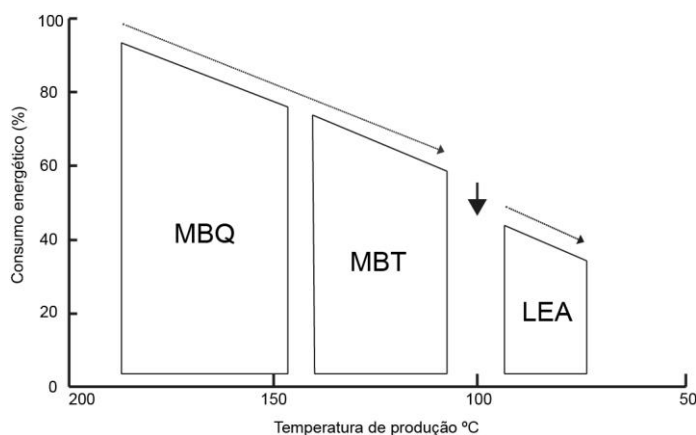


Figura 2.17 – Poupança energética da tecnologia Low-Energy Asphalt (Adaptado de MQP (2011)).

Para além de todos os benefícios já mencionados, as MBT são também viáveis em termos práticos, ou seja, têm muitas vantagens na fase de fabrico e de pavimentação. Na fase de fabrico, tal como já foi referido atrás como uma vantagem ambiental, as MBT possibilitam maiores taxas de incorporação de mistura asfáltica recuperada (RAP), devido à redução da viscosidade do ligante endurecido, reduzem o envelhecimento do ligante, o que aumenta a vida útil dos pavimentos e diminuem a necessidade de extração de pó, porque os agregados são aquecidos a temperaturas inferiores. Na fase de pavimentação, as principais mais-valias das MBT são as seguintes: o aumento da

trabalhabilidade e a compactabilidade, devido à redução da viscosidade do ligante; a pavimentação ser possível em climas mais frios, sendo assegurada a densidade necessária segundo os requisitos de compactação, já que a relação entre a temperatura ambiente e a da mistura é mais próxima; possibilidade de distâncias de transportes mais longas e abertura ao tráfego bastante mais rápida (D'Angelo *et al.*, 2008; EAPA, 2010; Zaumanis, 2010).

### 2.4.3. Tecnologias de Produção de Misturas Betuminosas Temperadas

Existem várias formas de agrupar estas tecnologias, por grau de redução de temperatura e/ou por meios para essa redução, ou seja, por aditivo (orgânico, ceras, químicos, surfatantes) ou por processos de formação de espuma. A divisão mais comum agrupa-as em aditivos orgânicos, químicos e técnicas de espuma, como disposto na Figura 2.18.

Algumas destas diminuem a viscosidade do ligante da mistura para se conseguir o revestimento completo dos agregados a temperaturas inferiores às praticadas nas misturas convencionais (Goh *et al.*, 2007). A diminuição da temperatura de produção reduz o envelhecimento do ligante e melhora a resistência da MB às variações de temperatura e à fadiga (EAPA, 2010).

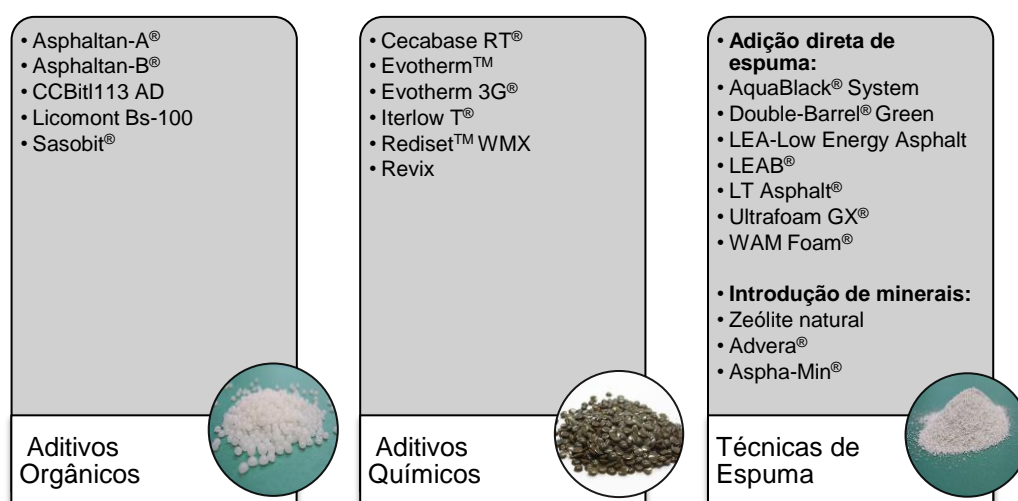


Figura 2.18 – Produtos e tecnologias de produção de MBT.

### Aditivos Orgânicos

Os aditivos orgânicos são genericamente ceras ou amidas de ácidos gordos, usados para, a temperaturas acima do seu ponto de fusão, baixar a viscosidade do ligante. Uma das exigências é que o tipo de aditivo usado deverá ter um ponto de fusão superior à máxima temperatura de serviço a que a MB estará exposta, acautelando problemas de deformação permanente e fragilidade a baixas temperaturas (D'Angelo *et al.*, 2008).

O Sasobit® (Figura 2.19) é um aditivo constituído por uma fina e longa cadeia cristalina de hidrocarbonetos alifáticos. Tecnicamente este produto permite reduções de temperatura na ordem dos 10 aos 30 °C, sendo completamente solúvel a partir dos 115°C, o seu limite superior da gama de temperaturas de amolecimento. A percentagem ótima de adição recomendada ronda os 3% em massa de ligante (Sasol Wax GmbH, 2004). Este produto é descrito como um “promotor de fluxo”, tanto durante a fase de mistura, como na pavimentação, graças à sua capacidade de baixar a viscosidade do ligante. A uma temperatura abaixo do referido ponto de fusão, o Sasobit® forma uma rede cristalina, em que o ligante conduz a uma maior estabilidade (Hurley e Prowell, 2005b). Zhao e Guo (2012) realizaram um estudo onde concluíram que a trabalhabilidade duma MBT a 145 °C equivale à duma MBC a 175 °C, logo a redução de temperaturas poderá atingir os 30 °C.



Figura 2.19 – Aditivo comercial Sasobit® (foto de autor – laboratório NIDIN).

Os betumes modificados com polímeros (PMB – *polymer modified bitumen*) têm uma maior energia de coesão, por isso, misturas betuminosas produzidas com este ligante apresentam maior resistência à fadiga, todavia são mais difíceis de trabalhar e compactar, campo no qual a introdução de Sasobit® ajudará (Sasol Wax GmbH, 2004). A capacidade deste aditivo ser combinado com polímeros para melhorar as características dos PMB's conduziu à criação de uma variante do produto, o Sasoflex, composto por um plastómero (o Sasobit®) e um elastómero (SBS), ligação conseguida através de um agente de cruzamento químico. O plastómero diminui a viscosidade do ligante durante a mistura e a aplicação e endurece-o às temperaturas de serviço, por sua vez, o elastómero garante a sua flexibilidade a temperaturas reduzidas (Hurley e Prowell, 2005b).

Testes demonstram aumento da resistência à deformação permanente em ambiente de tráfego pesado, visível através da redução da profundidade das rodeiras, no ensaio *Wheel Tracking*, como se constata pela Figura 2.20 (Sasol Wax GmbH, 2004).

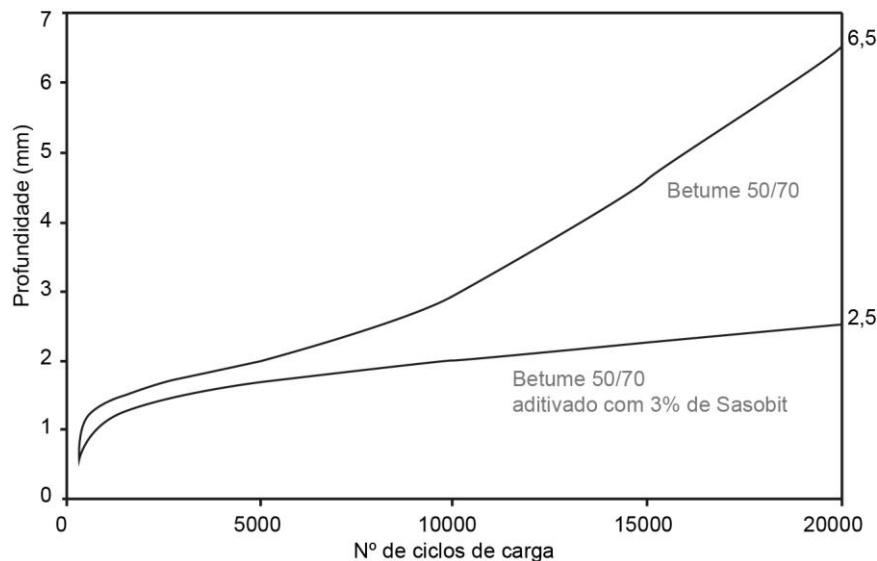


Figura 2.20 – Resultados comparativos do ensaio *Wheel Tracking* de uma mistura aditivada com Sasobit® (Adaptado de Sasol Wax GmbH (2004)).

Licomont Bs-100 é uma mistura de derivados de ácidos gordos, cujo ponto de fusão se situa entre os 140 e 145 °C. Este produto permite reduzir a viscosidade do ligante a temperaturas acima da sua gama de temperaturas de fusão, assim como reduz a penetração a 25 °C e aumenta a temperatura de amolecimento. Estas modificações traduzem-se numa melhoria da compactação da MB promovendo a coesão entre componentes, melhora a resistência à deformação permanente, diminuindo a tendência de formação de rodeiras e ainda reduz o risco de fissuração da mistura a baixas temperaturas (Clariant, 2007).

A Figura 2.21 ilustra o resultado do teste de pistas realizado sobre um provete de MBC e um de MBT com incorporação de Licomont Bs-100, no qual é visível que após os 8000 ciclos de carga a mistura aditivada não sofre mais incrementos de penetração.

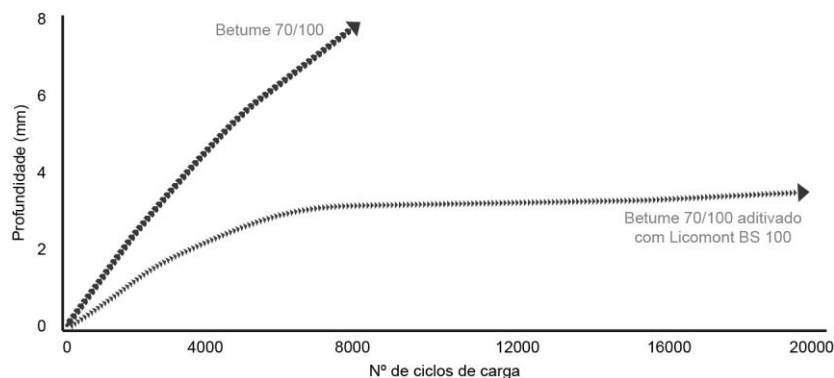


Figura 2.21 – Resultados comparativos do ensaio *Wheel Tracking* de uma mistura aditiva com Licomont Bs-100 (Adaptado de Clariant (2007)).



## Aditivos Químicos

Os aditivos químicos não interferem na viscosidade do ligante, não alterando a sua reologia, são na verdade líquidos surfatantes que atuam sobre a interface microscópica do betume com o agregado, com o objetivo de reduzir os atritos internos entre estes. Normalmente funcionam entre temperaturas de 85 a 140 °C (EAPA, 2010).

É adequado adicionar entre 0,2 e 0,6% em massa de ligante. Dependendo dos autores, estes produtos podem reduzir as temperaturas de produção entre 20 a 30 °C ou mesmo atingir reduções de 45 °C (EAPA, 2010; González, 2010). Estes aditivos podem ser adicionados diretamente ao betume ou já em fase de produção da mistura (Figura 2.22), traduzindo-se em melhoria de revestimento e adesão do ligante ao agregado e de compactação e trabalhabilidade da MB (D'Angelo *et al.*, 2008).

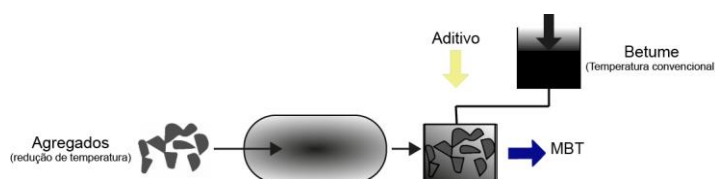


Figura 2.22 – Adição de aditivos químicos diretamente na mistura (Adaptado de González (2010)).

Rediset™ WMX (Figura 2.23) é um surfatante que promove a aderência entre ligante e agregados, ao mesmo tempo que garante a redução das temperaturas de produção e compactação. Pode ser aplicado na produção de qualquer tipo de betume, inclusive modificado com polímeros ou borracha (Almeida e Logaraj, 2010).



Figura 2.23 – Amostra de Rediset™ WMX (foto de autor – laboratório NIDIN).

Estudos comprovam que a incorporação deste aditivo não afeta negativamente a mistura face à MBC. Nomeadamente, Jones *et al.* (2010) compararam uma MB aditivada com químico Rediset™ WMX, produzida a uma temperatura de 120 °C e compactada a 110 °C, com uma MBC de padrão com respetivamente mais 35 °C de temperatura em cada uma das fases, onde verificaram que resistência à fadiga e à deformação

permanente não foram afetadas e que a MBT mostrou ter menor sensibilidade à água que a MBC.

### Técnicas de Espuma

Existem várias tecnologias de espuma que permitem baixar a viscosidade do ligante. A metodologia geral segue sempre a introdução de pequenas quantidades de água que ao se evaporarem irão aumentar o volume do betume, reduzindo assim a sua viscosidade. O nível de expansão depende de fatores como a quantidade de água e a temperatura do betume.

#### a) Introdução direta de espuma

É um processo (Figura 2.24) onde os agregados grossos são aquecidos entre 120 e 150 °C e adicionados ao betume a 170 °C. Previamente faz-se uma separação dos agregados em fração grossa e fina. À mistura é adicionado um aditivo, numa dosagem de 0,5% em massa de ligante, para promover o revestimento e a adesão aos agregados, regulando a expansão da espuma. De seguida, o agregado fino, à temperatura ambiente e com uma humidade ideal de 3%, é adicionado à mistura, processo que resulta na vaporização da água, formação de espuma, expansão do ligante e redução da temperatura de mistura de 100 °C. No final a MB estabilizará numa temperatura de cerca de 90 a 95 °C (D'Angelo *et al.*, 2008).

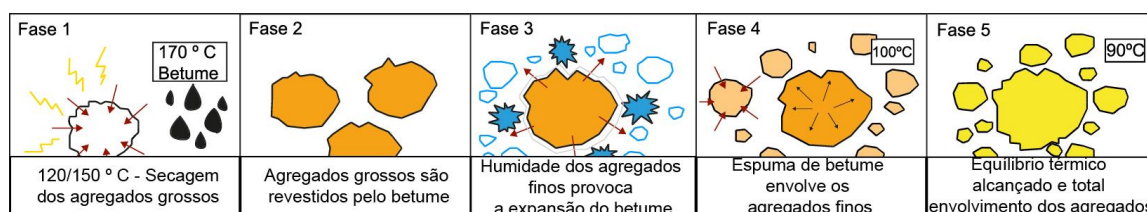


Figura 2.24 – Processamento da tecnologia LEA®-Low Energy Asphalt (Adaptado de McConnaughay (2012)).

As diferentes configurações desta tecnologia têm os mesmos benefícios: redução das temperaturas de produção e compactação, desempenho semelhante às MBC de padrão, redução do envelhecimento da mistura e redução de cerca de 50% dos custos energéticos na sua produção e por conseguinte das emissões de GEE.

#### b) Introdução de minerais

Dentro das tecnologias que introduzem minerais para reduzir a temperatura de produção de MB destacam-se as que usam zeolites sintéticos muito finos e os zeolites naturais. Todos estes minerais têm em comum conterem moléculas de água (20 a 21% do seu peso molecular) na sua estrutura, que são libertadas em contacto com o ligante quente,

produzindo microespuma. A expansão do ligante baixará a sua viscosidade (D'Angelo *et al.*, 2008; Devivere *et al.*, 2003; Hurley e Prowell, 2005; Hurley e Prowell, 2006; Prowell e Hurley, 2007).



## CAPÍTULO 3

### MISTURA BETUMINOSA TEMPERADA DO TIPO AC 20 BASE (MBAM)

---



### 3. DESEMPENHO LABORATORIAL DE MISTURA BETUMINOSA TEMPERADA DO TIPO AC 20 BASE LIGANTE (MBAM)

As misturas betuminosas de alto módulo de deformabilidade (MBAM ou *enrolé à module élevé* – designação francesa) surgiram na década de 80 na França, caracterizando-se por ostentarem maior resistência aos mecanismos de ruína que as tradicionais misturas. Este tipo de mistura produz-se com betume duro, o qual tem penetração reduzida (10 a 25 décimas de milímetro) e elevada temperatura de amolecimento (60 a 90 °C), sendo o betume 10/20 o mais utilizado (Capitão, 1996). Estas misturas usam-se essencialmente como camada de base ou de ligação, onde a resistência a esforços de tração é vital para evitar a ruína do pavimento devido ao fenómeno de fadiga.

Desde essa altura foram desenvolvidos vários estudos, os quais permitiram reduzir a percentagem de betume usada para os valores atuais (cerca de 5,5%), enveredar para novas utilizações das MBAM, nomeadamente como camada de regularização e de desgaste, definir o fuso adequado à mistura, e mais recentemente, o estudo da aplicação de betume modificado (Capitão, 1996). Por se tratar de uma mistura betuminosa não tradicional, não existem expressões que prevejam o seu comportamento, sendo necessário realizar ensaios de forma a medir experimentalmente as propriedades mecânicas (Capitão *et al.*, 2004).

Nos anteriores trabalhos (Cordeiro, 2012; Pereira, 2010) procedeu-se à formulação e à avaliação do desempenho final da mistura AC20 base 10/20 (MBAM) aditivada com Rediset<sup>TM</sup> WMX. Através da introdução do aditivo conseguiu-se uma redução significativa das temperaturas de fabrico e compactação, sendo o objetivo principal deste estudo comprovar que essa redução não coloca em questão os requisitos exigidos para este tipo de mistura. Com o presente trabalho, pretende-se finalizar e validar os estudos previamente desenvolvidos através da realização dos ensaios de desempenho mecânico à MBT, comparando os resultados com os obtidos para a mistura betuminosa a quente (MBQ), a padrão.

Tomou-se como pressupostos a percentagem de aditivo que demonstrou melhores resultados (1%), a percentagem ótima de ligante (5,2%) e a otimização das temperaturas de mistura e compactação, 124 °C e 114 °C, respetivamente. As temperaturas do ligante, dos agregados, de fabrico e de compactação de cada uma das misturas apresentam-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Temperaturas de mistura e compactação da MBT e da MBQ.

Mistura	Temperatura do Ligante (°C)	Temperatura dos Agregados (°C)	Temperatura de Mistura (°C)	Temperatura de Compactação (°C)
Mistura aditivada com 1% de Rediset <sup>TM</sup> WMX	170	114	124	114
Mistura Padrão	170	160	170	160

Para melhor compreensão e coerência serão apresentados os resultados conseguidos nos anteriores estudos, relativamente à caracterização dos agregados e dos ligantes.

### 3.1. Caracterização dos Agregados

De modo a poderem ser feitas comparações entre resultados, neste estudo foram usados agregados britados de origem calcária e fíler recuperado, provenientes das mesmas fontes do estudo anterior (Cordeiro, 2012). Esses componentes dividem-se em quatro frações, cujas curvas granulométricas se apresentam no Gráfico 3.1.

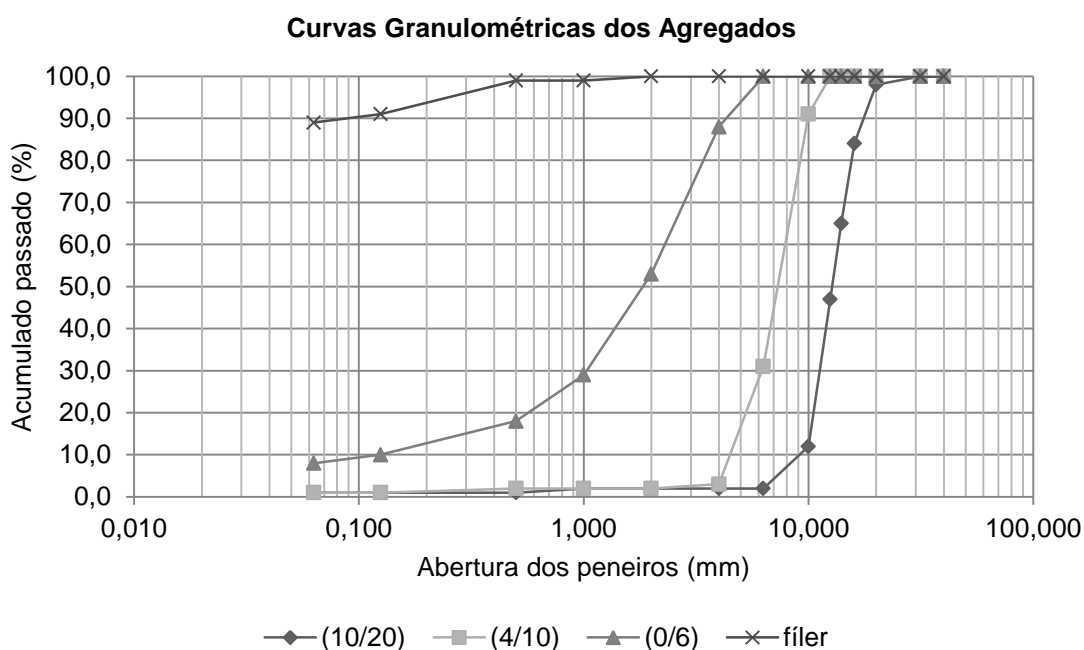


Gráfico 3.1 – Curvas granulométricas das frações da mistura AC 20 Base (MBAM).

Na Tabela 3.2 encontram-se as distribuições granulométricas e as percentagens relativas de cada uma das frações. A mistura foi produzida com 23,0% de brita 10/20, 19,0% de brita 4/10, 56,0% de pó de pedra 0/6 e 2,0% de fíler.



Tabela 3.2 – Distribuição granulométrica das frações da mistura e ajuste ao fuso AC 20 Base (MBAM).

Peneiros Série Base + Série 2	% Acumulada de Material Passado								Curva da Mistura	Fuso AC 20 Base (MBAM)
	10/20	23,0%	4/10	19,0%	0/6	56,0%	Filer	2,0%		
20	98,0	22,54	100,0	19,00	100,0	56,00	100,0	2,00	99,54	90-100
10	12,0	2,76	91,0	17,29	100,0	56,00	100,0	2,00	78,05	63-81
4	2,0	0,46	3,0	0,57	88,0	49,28	100,0	2,00	52,31	42-57
2	2,0	0,46	2,0	0,38	53,0	29,68	100,0	2,00	32,52	27-41
0,5	1,0	0,23	2,0	0,38	18,0	10,08	99,0	1,98	12,67	11-23
0,125	1,0	0,23	1,0	0,19	10,0	5,60	91,0	1,82	7,84	7-13
0,063	1,0	0,23	1,0	0,19	8,0	4,48	89,0	1,78	6,68	5-9

O quadro 14.03.2b do Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (CEEP – Pavimentação – Características dos Materiais) estabelece o limite superior e inferior onde a curva granulométrica da mistura se deve encaixar. A sua representação é feita no Gráfico 3.2.

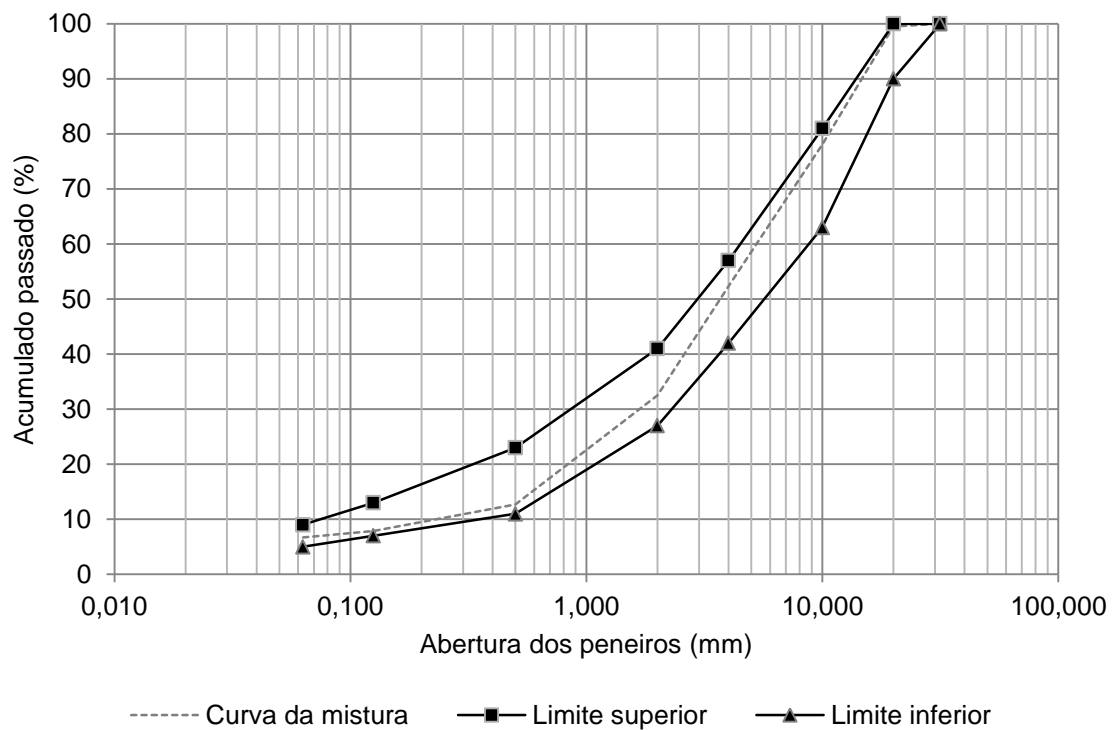


Gráfico 3.2 – Curva granulométrica e limites da mistura AC 20 Base (MBAM).

### 3.2. Caracterização dos Ligantes

Para produzir a mistura recorreu-se a betume de classe de penetração 10/20, denominado comumente por betume duro. Embora o aditivo Rediset™ WMX não altere significativamente as características do ligante, e o objetivo principal deste estudo não se prender com a sua análise, importa apresentar as características físicas e reológicas do ligante puro e aditivado. Estes dados encontram-se na Tabela 3.3 e Tabela 3.4.

Tabela 3.3 – Características de referência do betume 10/20 produzido pela Galp®.

Propriedades	Norma (s) Regulamentadora (s)	Unidade	Classificação B10/20	Valores Limite	
				Mín.	Máx.
Pen (25°C, 100g, 5s)	EN 1426	1/10mm	Classe 3	10	20
Temperatura de Amolecimento (AeB)	EN 1427	°C	Classe 4	60	76
Ponto de inflamação	EN ISSO 2592	°C	Classe 3	245	-
Após RTFOT – EN 12607-1					
Δ Massa	EN 12607-1	%	Classe 2	-	0,5
Penetração retida	EN 1426	1/10mm	Classe 2	55	-
Aumento da Temperatura de Amolecimento	EN 1427	°C	Classe 2	-	10
Viscosidade cinemática a 135°C	EN 12595	mm <sup>2</sup> /s	Classe 3	700	-
Solubilidade	EN 12592	%	Classe 2	-	99

Tabela 3.4 – Características do betume 10/20 com 1% de aditivo (Cordeiro, 2012).

Propriedades	Norma (s) Regulamentadora (s)	Unidade	B10/20 aditivado com 1% de Rediset™ WMX
Pen (25°C)	EN 1426	1/10mm	16,0
AeB	EN 1427	°C	64,8
Após RTFOT – EN 12607-1			
Δ Massa	EN 12607-1	%	0,29
Pen (25°C)	EN 1426	1/10mm	11,7
AeB	EN 1427	°C	72,2

A aplicação do aditivo Rediset™ não alterou as características do betume base a ponto de alterar as suas classes, como se constata pela análise dos limites da Tabela 3.3.

### 3.3. Caracterização das Misturas

Para avaliar a viabilidade do fabrico da MBT foram realizados vários ensaios de caracterização, de modo a determinar se não ocorre o comprometimento do desempenho final da mesma.

### 3.3.1. Máxima Baridade Teórica

Determinou-se a máxima baridade teórica da MBT, de acordo a norma EN 12697-5: 2009 – Procedimento A (volumétrico) onde, genericamente, a máxima densidade se conhece através do deslocamento do líquido no interior do picnómetro, de massa e volume conhecidos, pela massa do provete.

A máxima baridade teórica obtém-se da Equação 3.1:

$$\rho_{mv} = \frac{m2 - m1}{10^6 \times V_{Pt} - \frac{(m3 - m2)}{\rho_w}}$$

Equação 3.1

Sendo:

$\rho_{mv}$  – Máxima baridade teórica (Mg/m<sup>3</sup>)

$m1$  – Massa do picnómetro e da tampa (g)

$m2$  – Massa do picnómetro, da tampa e do provete (g)

$m3$  – Massa do picnómetro, da tampa, do provete e da água (g)

$V_{Pt}$  – Volume do picnómetro, de acordo com o Anexo C da referente norma (m<sup>3</sup>)

$\rho_w$  – Densidade da água à temperatura de ensaio (Mg/m<sup>3</sup>)

Na Tabela 3.5 encontram-se os dados relativos à MBQ (Cordeiro, 2012) e os dados da MBT obtidos presentemente.

Tabela 3.5 – Determinação da Máxima Baridade Teórica da MBQ e da MBT (MBAM).

Máxima Baridade Teórica				
EN 12697-5 – Procedimento A (Volumétrico)				
Parâmetro		Unidade	MBQ	MBT
Massa do picnómetro + tampa	m1	(g)	6741,9	6733,3
Massa do picnómetro + tampa + água	m4	(g)	18432,6	18433,3
Massa do picnómetro + tampa + amostra	m2	(g)	9142,8	9233,0
Massa do picnómetro + tampa + amostra + água	m3	(g)	19857,4	19920,0
Temperatura do líquido	-	(1°C)	15,0	18,0
Massa volúmica do líquido à temperatura do ensaio	$\rho_w$	Mg/m <sup>3</sup>	0,9992	0,9987
Volume do picnómetro	$V_{Pt}$	m <sup>3</sup>	0,0117	0,0117
Densidade máxima	$\rho_{bssd}$	Mg/m <sup>3</sup>	2,458	2,471

### 3.3.2. Sensibilidade à Água

Conduziu-se o ensaio para a determinação da Sensibilidade à Água segundo a norma EN 12697-12 e a EN 12697-23. De acordo com esta devem ser preparados pelo menos 6 provetes. Determinadas as dimensões dos provetes (ANEXO A.1), de acordo com a EN 12697-29 e as respectivas baridades, segundo a EN 12697-6 (ANEXO A.2), seleccionam-se os provetes para cada subgrupo do ensaio, o seco e o húmido.

Após a divisão, cada um dos subgrupos é acondicionado nas condições normalizadas, o seco deve ser reservado numa superfície plana, a uma temperatura  $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$  e o húmido acondicionado em água destilada à mesma temperatura. De seguida, ao subgrupo húmido é gradualmente aplicado vácuo, com uma pressão residual de  $(67 \pm 3)$  bars durante  $(30 \pm 5)$  min. Depois suprime-se lentamente a pressão e deixam-se os provetes por mais  $(30 \pm 5)$  min em água. Após este período determinam-se as dimensões desses provetes e rejeitam-se aqueles que sofram uma variação de volume de mais de 2%. Finalmente coloca-se o subgrupo húmido em estágio, em banho-maria a  $(40 \pm 1) ^\circ\text{C}$  durante 68 a 72 horas.

Decorrido esse período, o conjunto húmido e o seco são acondicionados durante 2 horas a  $15 ^\circ\text{C}$ , sendo finalmente ensaiados à tração indireta, com recurso a um estabilómetro (Figura 3.1), com base na Norma Europeia EN 12697-23: Bituminous mixtures - Test methods for *hot mix asphalt* - *Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens* num prazo máximo de 1 minuto depois de retirados do ambiente de temperatura controlada.

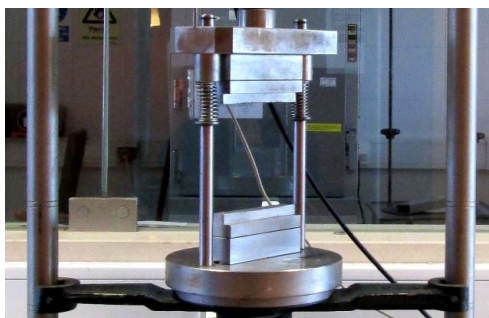


Figura 3.1 – Estabilómetro do ensaio de tração indireta (laboratório NIDIN - foto de autor).

Neste caso prepararam-se 8 provetes para a MBT, os quais foram compactados com 75 pancadas em cada face, segundo estipulado no Quadro 14.03.2d do CEEP para uma mistura do AC 20 base (MBAM). Desses foram rejeitados os 2 que apresentavam as piores características. O ensaio decorreu a uma temperatura de  $15 ^\circ\text{C}$ . Na Tabela 3.6 encontram-se os resultados comparativos do ensaio para a MBQ e a MBT.

Tabela 3.6 – Resultados do ensaio de Sensibilidade à Água (MBAM).

Sensibilidade à Água				
EN 12697-12/EN 12697-23				
Mistura	MBQ		MBT	
Subgrupo	Seco	Húmido	Seco	Húmido
Pi (kN)	28,141	25,520	25,384	14,105
ITS	0,003	0,003	0,003	0,001
Tipo de rotura	a	a	a	c
ITSR (%)	92		56	

Na tabela acima estão indicados os tipos de rotura que cada provete sofreu, nomeadamente o tipo a e c, rotura bem definida e combinação, respetivamente, ilustrados na Figura 3.2.



Figura 3.2 – Rotura do tipo a e c, respetivamente (fotos de autor).

### 3.3.3. Resistência à Deformação Permanente

Determinou-se a resistência à deformação permanente recorrendo ao ensaio de pista, de acordo com a Norma Europeia EN 12697-22, cujos principais conteúdos foram referidos no subcapítulo 2.3.4. O ensaio foi efetuado num dispositivo pequeno – *small size device*, pelo procedimento B, com provetes acondicionados ao ar.

Segundo a mencionada norma, exigem-se dois provetes para o ensaio executado com o dispositivo pequeno e que estes tenham uma espessura nominal de 60 mm, já que a dimensão máxima do agregado da mistura se situa entre 16 e 22mm. Moldou-se então uma placa de dimensão (618×421×60) mm (1), a qual foi depois serrada em duas lajes de dimensão (300×400×60) mm (2), como ilustra a Figura 3.3, sendo depois feita a caracterização em termos dimensões e baridade (ANEXO B.1 e B.2).



Figura 3.3 – Moldagem (1) e provetes serrados (2) para o ensaio *Wheel Tracking* (fotos de autor).

As lajes foram conduzidas à temperatura de ensaio de 60 °C, num ambiente controlado, durante um período de pelo menos 4 horas. Foram depois fixadas no dispositivo de ensaio e foi-lhes aplicado pó de talco na zona de deslize da roda, por forma a evitar o sobreaquecimento, que poderia conduzir a desgaste precoce indesejável. Após o ajuste da máquina retiraram-se as leituras iniciais do deslocamento vertical da roda, 6 ou 7 leituras na primeira hora e, a partir daí, pelo menos uma leitura a cada 500 ciclos de carga.

Normativamente dá-se por concluído o ensaio ao fim de 10000 ciclos de carga ou de terem sido atingidos 20 mm de profundidade da rodeira. Neste caso o número limite de ciclos foi primeiro atingido.

Dispõem-se na Tabela 3.7 os resultados comparativos da taxa de variação da deformação permanente ( $WTS_{AIR}$ ), da profundidade proporcional da rodeira ( $PRD_{AIR}$ ) e da profundidade da rodeira ( $RD_{AIR}$ ) para a MBQ e da MBT. Para melhor compreensão da evolução da profundidade da rodeira ao longo dos ciclos de carga, apresenta-se o Gráfico 3.3, cujos dados se encontram no ANEXO B.3.

Tabela 3.7 – Resultados comparativos do ensaio *Wheel Tracking* da MBQ e da MBT.

Resistência à Deformação Permanente		
EN 12697-22		
Resultado	Mistura	Valor médio
$WTS_{AIR}$ (mm/10 <sup>3</sup> ciclos de carga)	MBQ	0,160
	MBT	0,186
$PRD_{AIR}$ (% 1E4 ciclos de carga)	MBQ	6,9
	MBT	8,0
$RD_{AIR}$ (mm 1E4 ciclos de carga)	MBQ	4,28
	MBT	4,79

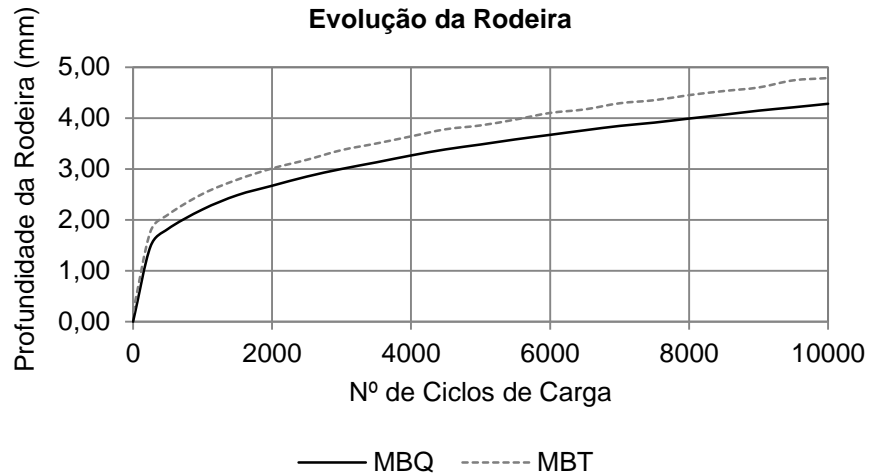


Gráfico 3.3 – Profundidade da rodeira ao longo dos ciclos de carga para a MBQ e a MBT.

Para a MBQ e para a MBT foi obtida uma profundidade de rodeira aos 10000 ciclos de carga de 4,28 mm e de 4,79 mm, respetivamente.

#### 3.3.4. Módulo de Rigidez

O módulo de rigidez, o ângulo de fase e o coeficiente de Poisson são parâmetros imprescindíveis à análise linear elástica dos materiais betuminosos. Através destes, define-se e quantifica-se a resposta mecânica que um pavimento rodoviário terá, face às solicitações a que será exposto ao longo do seu período de vida útil. Para avaliar estas grandezas conduziu-se o ensaio de flexão em 4 pontos, de acordo com o estipulado no Anexo B da Norma EN 12697-26, tal como indicado no subcapítulo 2.3.2.

O ensaio foi realizado com controlo à extensão, ou seja, aplicou-se uma taxa de deslocamento controlada, de modo a promover uma amplitude de extensão constante. Segundo o indicado na Norma EN 13108-20, o ensaio de flexão em 4 pontos foi executado a 20 °C de temperatura e o módulo de rigidez foi obtido a uma frequência de 10 Hz, de modo a obter resultados correlacionáveis com os da resistência à fadiga e em linha com a maioria dos estudos desenvolvidos até à data, embora a normalização indique que deve ser a 8 Hz.

No anterior estudo (Cordeiro, 2012) o ensaio foi realizado de acordo com as indicações que a literatura dá sobre este ensaio, contudo existe alguma falta de clareza nas indicações do procedimento a seguir. Estabeleceu-se a realização de um varrimento de frequências (0.1Hz, 0.2Hz, 1Hz, 5Hz, 8Hz, 10Hz, 20Hz, 50Hz e de novo 0.1Hz) a uma amplitude de extensão de 50µm. A repetição da frequência inicial serve para verificar se o provete foi danificado. Se o módulo de rigidez medido na primeira frequência e na repetição final variar mais de 3%, o provete considera-se inutilizado. Em cada uma das

frequências deverão ser realizadas pelo menos 200 repetições, sendo que a soma não deverá exceder as 3000 repetições de modo a evitar danos prematuros.

A Norma indica que se preparem pelo menos 6 vigas, que se ensaiem 4 e se reservem 2. Foram moldadas placas de dimensão (618×421×80) mm, compactadas com recurso a um cilindro de rolos. Depois, foram serradas vigas de dimensão nominal (400×60×60) mm, dimensões que respeitam as indicações da norma, segundo a qual B (largura) e D (altura) devem ser pelo menos 3 vezes a dimensão máxima do agregado da mistura e L (largura) pelo menos 6 vezes a dimensão de B ou D, qual a maior.

Do ensaio resultam o Gráfico 3.4 e o Gráfico 3.5, onde se comparam os módulos de rigidez e os ângulos de fase da MBQ e da MBT ao longo das várias frequências, respetivamente. Os dados relativos a este gráfico encontram-se também no ANEXO C.2.

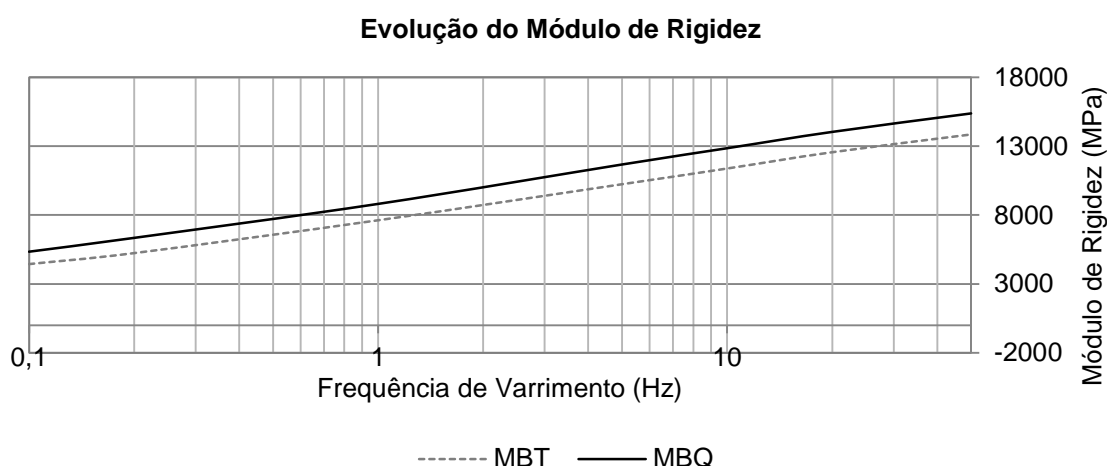


Gráfico 3.4 – Variação do módulo de rigidez ao longo do varrimento de frequências.

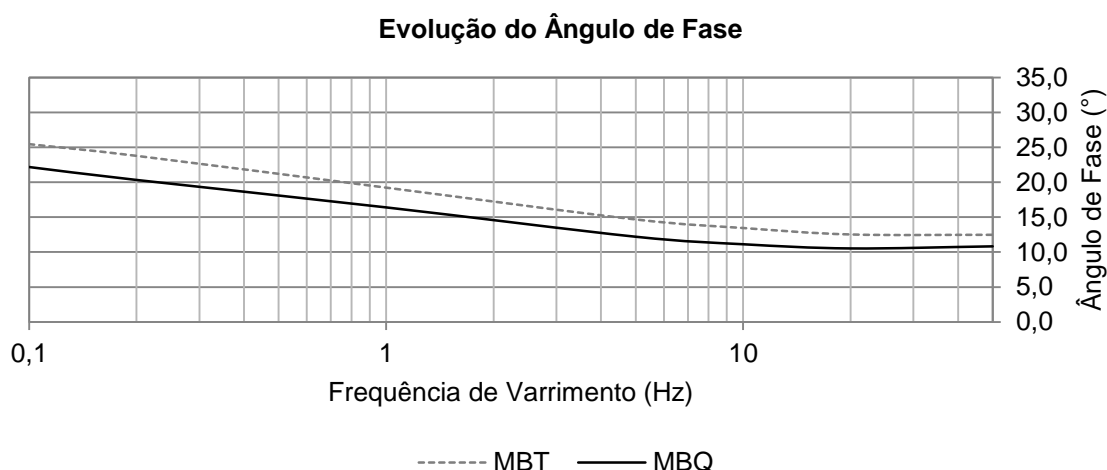


Gráfico 3.5 – Variação do ângulo de fase ao longo do varrimento de frequências.



Através do varrimento de frequências obteve-se um módulo de rigidez, aos 10Hz, de 12846 MPa para a MBQ e de 11374 MPa para a MBT.

### **3.3.5. Resistência à Fadiga**

Segundo a Norma NP 13108-1: *Bituminous mixtures – Material specifications – Part 1: Asphalt Concrete*, a resistência à fadiga, assim como o módulo de rigidez, são requisitos de desempenho base, fundamentais para caracterizar o comportamento da mistura em serviço.

Determinou-se a resistência à fadiga da MBT de acordo com o indicado no subcapítulo 3.3.5, seguindo a Norma EN 12697-24, pelo ensaio de flexão em 4 pontos. Foram moldadas placas, de dimensão (618×421×80) mm, as quais foram serradas para obter 18 provetes prismáticos de dimensão (400×60×60) mm. Posteriormente foi feita a sua caracterização relativamente a dimensões e baridade (ANEXO C.1).

O ensaio foi executado com controlo à deformação, o qual se dá por terminado depois da redução de 50% do valor do módulo de rigidez inicial, obtido ao centésimo ciclo de carga.

Apesar da Norma EN 13108-20: *Bituminous mixtures – Material specifications – Part 20: Type Testing* indicar que o ensaio de flexão em 4 pontos deve ser realizado a uma temperatura de 20 °C e a uma frequência de 30 Hz, optou-se por fazê-lo a 10 Hz, em coerência com o estudo que se pretende concluir (Cordeiro, 2012) e, sobretudo, porque a literatura indica ser o valor mais adequado, possivelmente por reproduzir melhor as condições de serviço.

Definiram-se três níveis de extensão, que possibilitaram que a rotura ocorresse entre os  $10^4$  e os  $2 \times 10^6$  ciclos de carga. Em cada um dos níveis foram ensaiadas 6 vigas. A partir dos dados obtidos obteve-se a lei de fadiga da mistura, a qual permite estabelecer qual o nível de extensão para um milhão de ciclos.

No anterior trabalho a MBQ foi ensaiada aos patamares de extensão 200, 300 e 400  $\mu\epsilon$ , numa frequência de 10 Hz. No ANEXO C.3.1 encontram-se os respetivos dados, a partir dos quais foi construído o Gráfico 3.6 e obtida a lei de fadiga da MBQ (Equação 3.2).

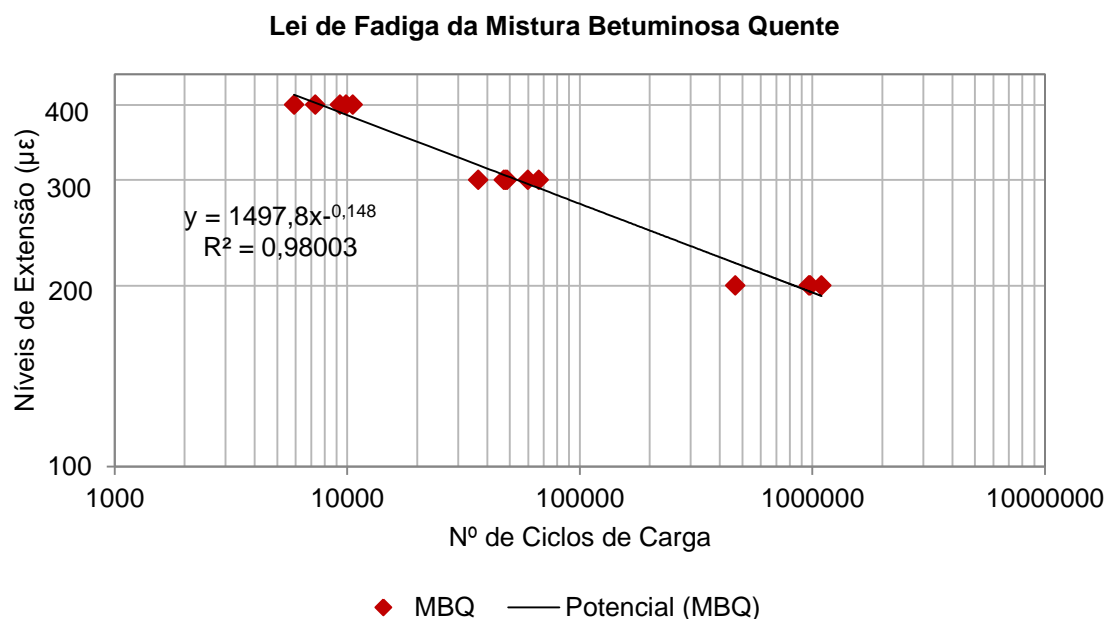


Gráfico 3.6 – Lei de fadiga da MBQ (Adaptado de (Cordeiro, 2012)).

$$N = 1497,8 \times \varepsilon_t^{-0,148}$$

Equação 3.2

No atual trabalho ensaiou-se a MBT aos patamares de extensão de 200, 300 e 400  $\mu\epsilon$ , também à frequência de 10 Hz. Os dados usados para definir o Gráfico 3.7 e a lei de fadiga da MBT (Equação 3.3) encontram-se no ANEXO C.3.2. A Figura 3.4 ilustra alguns dos pormenores do dispositivo do ensaio, nomeadamente os dois grampos externos que fixam a viga e os dois internos que lhe aplicam flexão.



Figura 3.4 – Pormenores do dispositivo do ensaio de flexão em 4 pontos (fotos de autor – laboratório NIDIN).

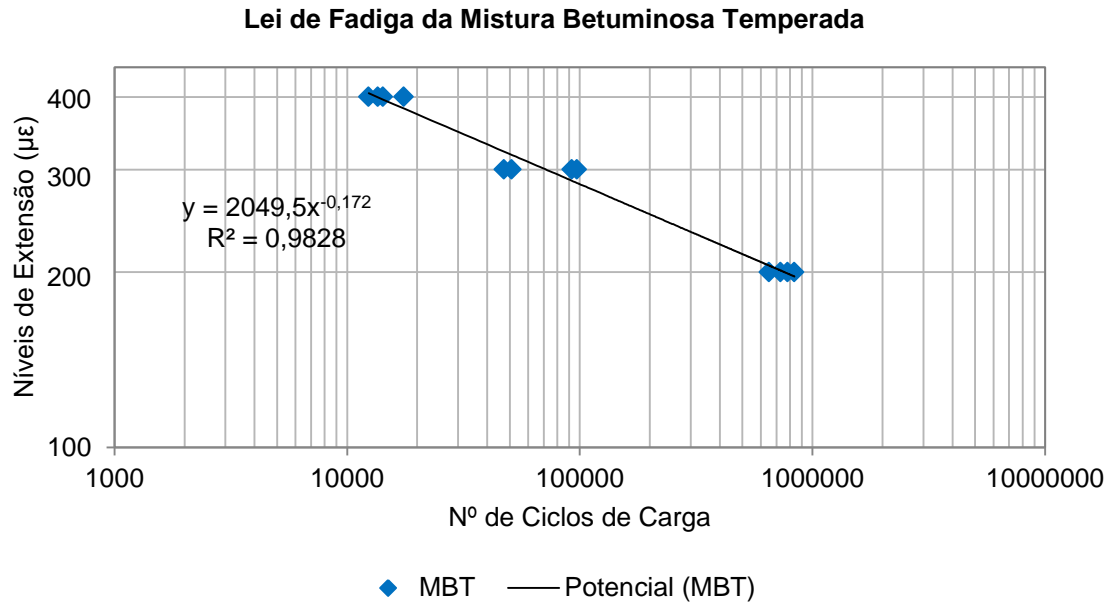


Gráfico 3.7 – Lei de Fadiga da MBT.

$$N = 2049,5 \times \epsilon_t^{-0,172}$$

Equação 3.3

Através das leis de fadiga de cada uma das misturas (Equação 3.2 e Equação 3.3) obteve-se um nível de extensão à tração, para um milhão de ciclos de carga, de 194  $\mu\epsilon$  e de 190  $\mu\epsilon$ . O Gráfico 3.8 compila as duas leis de fadiga, de modo a simplificar a análise comparativa do comportamento das duas misturas.

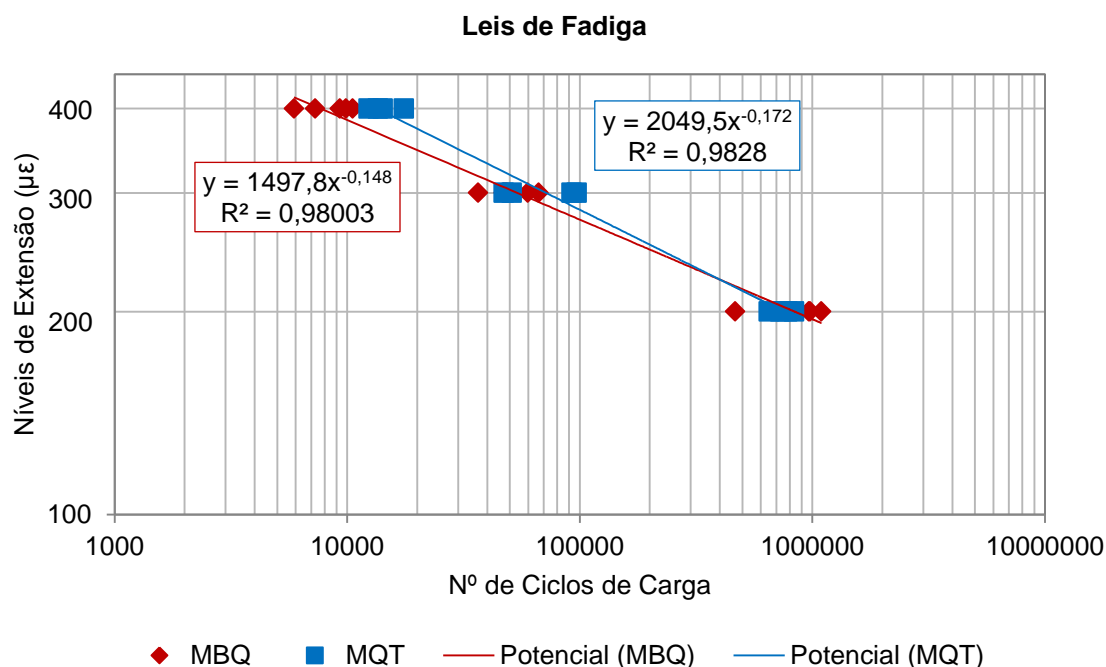


Gráfico 3.8 – Comparação da Lei de Fadiga da MBQ e da MBT.

### 3.4. Discussão dos Resultados

Após a realização dos ensaios de caracterização da MBT procedeu-se à análise comparativa dos resultados.

Relembrando, compararam-se neste estudo uma mistura betuminosa, do tipo AC20 Base (MBAM), produzida de forma convencional, a 170 °C e compactada a 160 °C, com a mesma mistura, mas desta feita produzida a 124 °C e compactada a 114 °C. Esta redução das temperaturas de fabrico e compactação foi conseguida através da introdução de 1% de Rediset<sup>TM</sup> ao betume base (10/20). O objetivo do estudo consiste em comprovar que este tipo de mistura, ainda que produzida a temperaturas bastante inferiores às habituais, mantém as características de desempenho semelhantes às da mistura padrão.

Tal como referido atrás, consideraram-se fiáveis e válidos os resultados obtidos nos anteriores estudos (Cordeiro, 2012; Pereira, 2010) relativamente à granulometria dos agregados, à percentagem ótima de betume, obtida através do estudo de Marshall e à otimização das temperaturas de fabrico e compactação.

De forma a facilitar a apresentação e discussão dos resultados, estes apresentam-se compilados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Desempenho mecânico comparativo entre a MBQ (Cordeiro, 2012) e a MBT.

Comparação do Desempenho das Misturas em Estudo			
Tipo de Mistura	AC 20 Base (MBAM)		
Mistura	-	MBQ	MBT
Betume	-	10/20	10/20 com 1% de Rediset™ WMX
Percentagem de Betume	%	5,2	5,2
Temperatura de fabrico/compactação	°C	170/160	124/114
Máxima Baridade Teórica	Mg/m <sup>3</sup>	2,458	2,471
Sensibilidade à Água (ITSR)	%	92	56
Resistência à Deformação Permanente			
WTS <sub>AIR</sub>	mm/10 <sup>3</sup> ciclos de carga	0,160	0,186
PRD <sub>AIR</sub>	% 1E4 ciclos de carga	6,9	8,0
RD <sub>AIR</sub>	mm 1E4 ciclos de carga	4,28	4,79
Módulo de Rigidez (10Hz)			
Módulo de rigidez	MPa	12846	11374
Ângulo de fase	°	11,1	13,5
Resistência à Fadiga (10Hz)			
Lei de fadiga	-	$1497,8x^{-0,148}$	$2049,5x^{-0,172}$
Fator de correlação	-	0,98003	0,98280
Extensão aos 10 <sup>6</sup> ciclos de carga	μɛ	194	190

Tal como esperado, a baridade obtida para ambas as misturas foi bastante semelhante. A Sensibilidade à Água, que se traduz pelo cociente entre a resistência à tração indireta do subgrupo designado de húmido e do subgrupo designado de seco, mostrou ser muito superior para a mistura de referência. A MBQ obteve uma taxa de resistência à tração indireta de 92% enquanto a MBT obteve apenas de 56%. Este valor corrobora o resultado do estudo anterior (Cordeiro, 2012), que obteve um resistência de 58%. Enquanto nos provetes da mistura de padrão e nos do subgrupo seco da MBT se obtiveram roturas frágeis, bem definidas, do tipo a, nos provetes do subgrupo húmido da MBT a rotura passou a ser do tipo c, uma combinação, o que denota que o aditivo poderá ter reagido na mistura durante o período de acondicionamento.

Face à resistência à deformação permanente, a qual se manifesta pela profundidade da rodeira, que se forma ao fim de 10000 ciclos de carga no ensaio *Wheel Tracking*, pode afirmar-se que os resultados obtidos superaram significativamente os do anterior estudo. A profundidade da rodeira (RD<sub>AIR</sub>) foi de 4,28mm para a MBQ e de 4,79 mm para a MBT e a profundidade proporcional da rodeira (PRD<sub>AIR</sub>) foi de 6,9% para MBQ e de 8,0% para a MBT, valores relativamente próximos. Pode também afirmar-se que na fase inicial a MBT sofre uma deformação superior à da MBQ, a partir daí a evolução da rodeira dá-se

de forma constante e proporcional. Da análise da baridade de ambas as misturas, ressalta o facto de a MBT ser mais densa que a MBQ, fator que poderá ter contribuído para a melhoria do desempenho comparativamente aos anteriores resultados.

O módulo de rigidez obtido para a MBT foi ligeiramente inferior ao da MBQ, o que se traduz num comportamento também ligeiramente inferior face à deformação permanente, facto constatado através dos resultados do ensaio de Pista. Em coerência, o ângulo de fase obtido para a MBT foi superior ao da MBQ, ou seja, a resposta do material face à solicitação que lhe foi imposta, sofre um maior desfasamento em relação à carga, todavia não são diferenças significativas entre as misturas.

Comparando os resultados obtidos através do ensaio de resistência à fadiga, destacam-se os elevados fatores de correlação obtidos para ambas as misturas, o que se traduz no elevado grau de correlacionamento entre as duas variáveis. As extensões aos  $10^6$  ciclos de carga obtidas são próximas, de  $194 \mu\epsilon$  para a MBQ e de  $190 \mu\epsilon$  para a MBT, todavia através do Gráfico 3.8 é perceptível o maior declive da reta que caracteriza a vida à fadiga da MBT face ao da que caracteriza a MBQ. Este fator traduzir-se-á, em termos práticos, no mais rápido envelhecimento da MBT face à MBQ durante o seu período de vida útil, sendo que na reta final as duas misturas se igualam e ocorre uma ligeira inversão. Ainda assim, não existe uma disparidade de resultados significativa entre as duas misturas em estudo.

## CAPÍTULO 4

### MISTURA BETUMINOSA TEMPERADA DO TIPO AC 14 SURF (BBr)

---





#### **4. FORMULAÇÃO E DESEMPENHO LABORATORIAIS DE MISTURA BETUMINOSA TEMPERADA DO TIPO AC14 SURF (BBr)**

Numa segunda fase iniciou-se um novo programa experimental, com o principal objetivo de validar uma mistura temperada do tipo AC14 Surf (BBr), de acordo com os requisitos estipulados no CEEP, aditivada com o aditivo orgânico comercial Sasobit®.

Os pavimentos rodoviários flexíveis devem responder a dois requisitos globais de qualidade, devem ser capazes de resistir estruturalmente às solicitações de tráfego, decorrentes das cargas impostas pela passagem repetida dos veículos, e às solicitações climáticas, ao mesmo tempo que garantam condições funcionais, de conforto e segurança para os utentes. As características da camada superficial de desgaste são fundamentais às condições de comodidade e de segurança de circulação nos pavimentos (Alves, 2007).

A mistura do tipo AC14 Surf (BBr), tal como a designação indica, é adequada como camada superficial de desgaste, cujos requisitos dos agregados e propriedades da camada se estabelecem nos Quadros 14.03.2m e 14.03.2n do CEEP, respetivamente. Para esta camada é imprescindível a avaliação da irregularidade longitudinal, da macrotextura superficial e do coeficiente de atrito para determinar o atrito transversal.

Devido às solicitações que lhe são impostas os pavimentos começam a perder progressivamente a qualidade inicial. As degradações desenvolvem-se segundo o “princípio da cadeia de consequências”, ou seja, as degradações não evoluem isoladamente no tempo, interagem entre si, dando origem a novos tipos, que vão alterar as iniciais. As degradações funcionais, embora, na sua maioria, tenham origem nas camadas inferiores, vêm a manifestar-se à superfície, na camada de desgaste. A aplicação de materiais que permitam aumentar consideravelmente as suas características resistentes é fundamental para evitar ou retardar a necessidade de intervenção (Picado-Santos *et al.*, 2008).

Neste estudo pretende-se aplicar um betume modificado com polímero (PMB – na designação inglesa *polymer modified bitumen*). O principal objetivo da introdução de polímero no betume é melhorar características de elasticidade e de sensibilidade às temperaturas, de modo a aumentar a resistência à fadiga, deformação permanente e envelhecimento. Segundo o CEEP 14.03 – Pavimentação: Características dos materiais, estes tipos de ligantes empregam-se em misturas betuminosas drenantes e em misturas betuminosas rugosas (EP, 2009). O PMB utilizado neste estudo foi produzido com um elastómero (SBS – estireno-butadieno-estireno), o qual confere um aumento da temperatura de amolecimento e uma redução da penetração. A sua introdução no

betume convencional aumenta a flexibilidade e ductilidade a temperaturas reduzidas, possibilitando a sua aplicação numa gama de temperaturas mais vasta (Read *et al.*, 2003).

Uma das características dos PMB's é o facto de terem mais energia de coesão que os betumes convencionais. As misturas produzidas com estes ostentam maior resistência à fadiga, mas em contrapartida necessitam de temperaturas de fabrico e compactação mais elevadas e são mais difíceis de trabalhar e compactar (Sasol Wax GmbH, 2004). O aditivo Sasobit® é recomendado como um co-modificador, classificado como um “promotor” de fluência devido à sua capacidade de reduzir a viscosidade, melhorando a trabalhabilidade e compactabilidade das misturas.

Assim sendo, pretende-se tirar partido do PMB para produzir uma mistura para camada de desgaste mais resistente e do aditivo Sasobit® para reduzir as temperaturas de produção.

Para o efeito foram feitos os estudos de formulação da mistura, nomeadamente a caracterização dos agregados, a determinação da percentagem de aditivo ótima, o estudo das temperaturas de fabrico e compactação e, finalmente, o estudo da percentagem ótima de betume a aplicar. Posto isto, procedeu-se à avaliação do desempenho da mistura, através da realização de ensaios de caracterização mecânica, referidos no capítulo 3.3.

#### **4.1. Caracterização dos Agregados**

Para o presente estudo optou-se por usar agregados grossos de origem basáltica, tendo em conta que se pretende produzir uma mistura para camada de desgaste e o uso de agregados de origem calcária poderia implicar o polimento dos mesmos. Usou-se pó de pedra e filer comercial de origem calcária (Figura 4.1). A ficha técnica de cada um dos agregados encontra-se no ANEXO E.



Figura 4.1 – Frações de agregados usados para o fabrico da mistura (fotos de autor).

Para a caracterização dos agregados seguiram-se as Normas NP EN 932.1 e 932.2, Métodos de Amostragem e Métodos de Redução das Amostras Laboratoriais, respetivamente. Os métodos de amostragem existem com objetivo de se conseguir amostras de ensaio que representem, o mais fidedignamente possível, os agregados que serão empregues no fabrico da mistura, evitando desta forma erros de análise causados por amostragens tendenciosas, devido à existência de lotes demasiado heterogéneos entre si. Os procedimentos de redução das amostras pretendem diminuir o número de divisões feitas até ser obtida a massa do provete e, sobretudo, evitar que o responsável faça ajustes, introduzindo determinadas partículas.

A recolha de materiais foi feita segundo a “pilha prismática de materiais” indicada na Norma NP EN 932.1, que prevê que se recolham 5 parcelas para o terço inferior, 3 parcelas do terço central e uma parcela para o terço superior. A redução de amostras fez-se com recurso a um divisor, comumente designado de esquartelador (Figura 4.2).



Figura 4.2 – Esquartelador para redução das amostras (foto de autor – laboratório NIDIN).

#### 4.1.1. Granulometria

A determinação da granulometria executou-se de acordo com a Norma NP EN 933.1, sendo feita peneiração com lavagem prévia, secagem e estabilização da massa dos provetes. De seguida procedeu-se à peneiração, na qual foram usados os “peneiros da série base + série 2” (Figura 4.3).



Figura 4.3 – “Peneiros série base + série 2” usados na determinação da granulometria dos agregados (foto de autor – laboratório NIDIN).

Os componentes usados para produzir a mistura dividem-se em quatro frações, cujas curvas granulométricas se encontram no Gráfico 4.1.

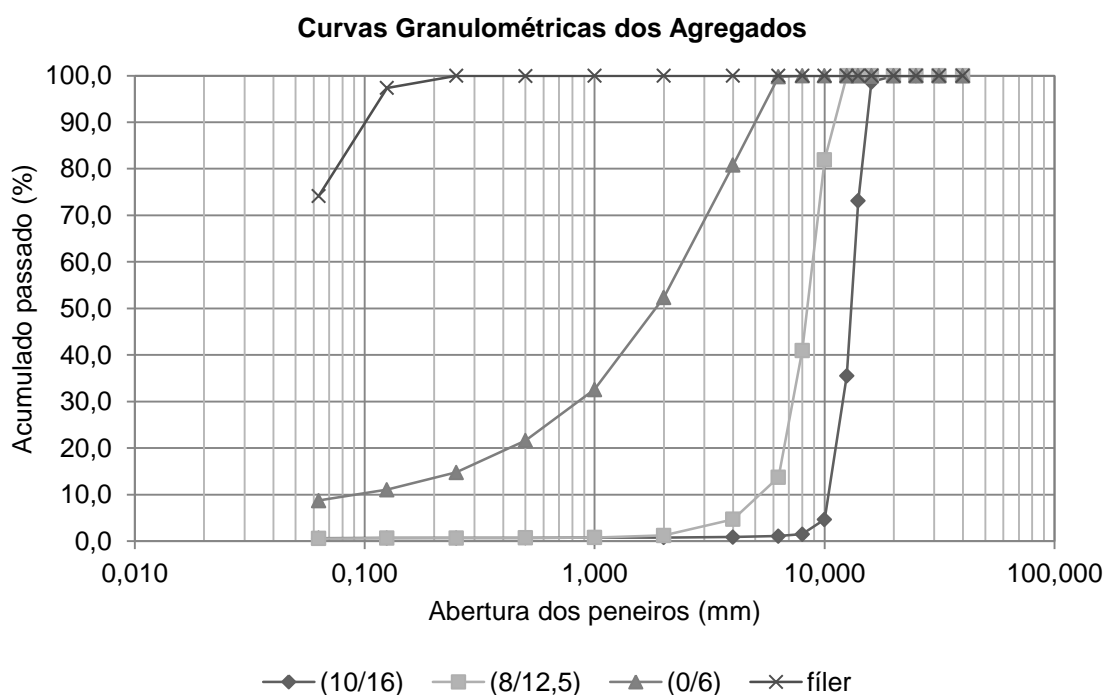


Gráfico 4.1 – Curvas granulométricas das frações da mistura AC14 Surf (BBr).

Na Tabela 4.1 apresentam-se as distribuições granulométricas e as percentagens relativas definidas para cada uma das frações. A mistura foi produzida com 27% de brita 1, 32% de brita 2, 36% de pó de pedra e 5% de fíler, percentagens que permitem que a curva encaixe entre os limites superior e inferior, estabelecidos no Quadro 14.03.2I do CEEP para a mistura do tipo AC14 Surf (BBr).

Tabela 4.1 – Distribuição granulométrica das frações da mistura e ajuste ao fuso AC14 Surf (BBr).

Peneiros Série Base + Série 2	% Acumulada de Material Passado								Curva da Mistura	Fuso AC 14 Surf (BBr)
	10/16	27,0%	8/12,5	32,0%	0/6	36,0%	Fíler	5,0%		
20	100,0	27,00	100,0	32,00	100,0	36,00	100,0	5,00	100,00	(100-100)
14	73,2	19,75	100,0	32,00	100,0	36,00	100,0	5,00	92,75	(90-100)
10	4,7	1,26	81,9	26,22	100,0	36,00	100,0	5,00	68,48	(62-78)
4	0,9	0,24	4,7	1,51	80,8	29,09	100,0	5,00	35,84	(30-44)
2	0,8	0,22	1,2	0,40	52,4	18,86	100,0	5,00	24,48	(22-30)
0,5	0,7	0,19	0,7	0,24	21,6	7,78	100,0	5,00	13,21	(12-21)
0,125	0,7	0,18	0,7	0,21	11,1	3,98	97,4	4,87	9,24	(7-13)
0,063	0,6	0,17	0,6	0,19	8,7	3,14	74,1	3,71	7,21	(4-9)

A curva granulométrica obtida para a mistura e os referidos limites encontram-se no Gráfico 4.2.

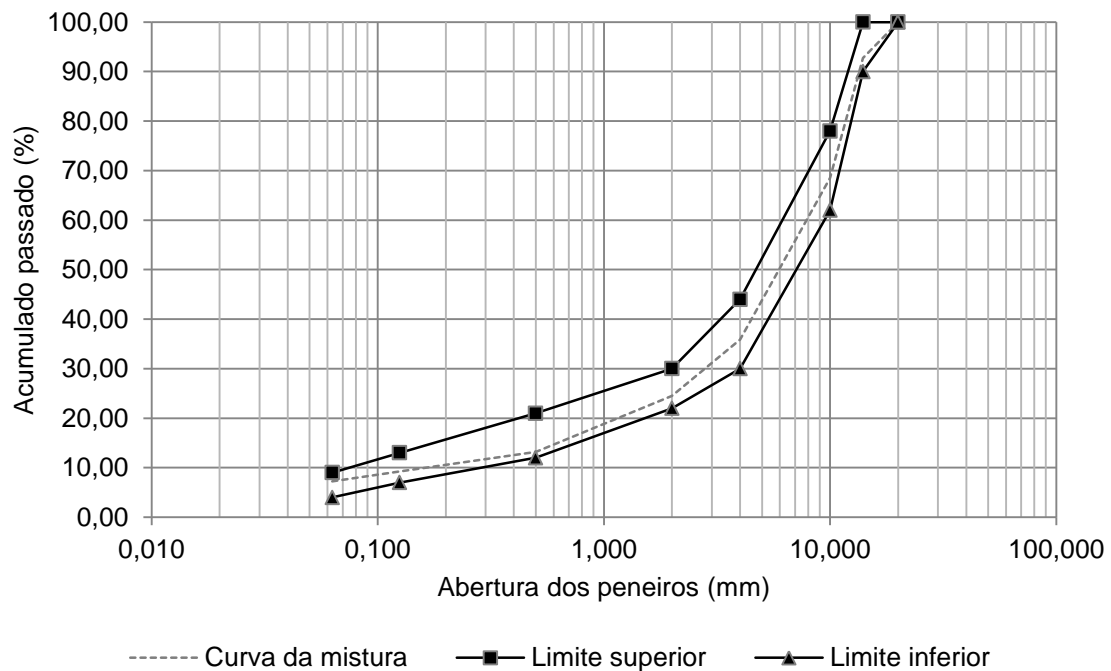


Gráfico 4.2 – Curva granulométrica e fusos limite da mistura AC14 Surf (BBr).

#### 4.1.2. Massas Volúmicas e Absorção

A determinação das massas volúmicas e absorção de água dos agregados foi feita de acordo com a Norma NP EN 1097-6, a qual contempla dois métodos, o do picnómetro e o do cesto de rede metálica, consoante a dimensão dos agregados. Segundo esta, a massa volúmica resulta do rácio entre a massa e o volume das partículas. A massa de uma pesagem do provete saturado com superfície seca e de uma segunda pesagem do mesmo, mas desta vez após secagem e estabilização. O volume obtém-se a partir da massa de água deslocada, pela redução de massa no método do cesto ou pelas sucessivas pesagens no método do picnómetro.

Para o cálculo das massas volúmicas das partículas, em  $\text{Mg/m}^3$ , recorre-se às seguintes expressões:

- Massa volúmica do material impermeável das partículas

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w}$$

Equação 4.1

- Massa volúmica das partículas com superfície seca

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w}$$

Equação 4.2

- Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w}$$

Equação 4.3

- Absorção de água (em % da massa seca)

$$WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4}$$

Equação 4.4

Sendo:

$M_1$  – Massa do agregado saturado com superfície seca ao ar (g);

$M_2$  – Massa do cesto/picnómetro com o provete de agregado saturado (g);

$M_3$  – Massa do cesto imerso em água/massa do picnómetro cheio de água (g);

$M_4$  – Massa do provete no ar, seco em estufa (g);

$\rho_w$  – Massa volúmica da água à temperatura de ensaio, determinada de acordo com o Anexo D da norma NP EN 1097-6.

Apesar de a Norma indicar, à partida, o método do picnómetro para partículas de dimensão entre 4 mm e 31,5 mm, refere também que o método do cesto de rede metálica pode igualmente ser usado para esse efeito. Assim, para o agregado de fração 10/16 usou-se o método do picnómetro, assim como para o pó de pedra, de fração 0/6. Todavia, por dificuldades técnicas, usou-se o método do cesto de rede metálica para o agregado de fração 8/12,5. Na Figura 4.4 encontram-se os procedimentos sequenciais da determinação da massa volúmica e da absorção do agregado da fração 0/6, através do método do picnómetro: a verificação do agregado saturado com a superfície seca pelo método do molde troncocónico (1), a pesagem da massa M2 (2) e a determinação da temperatura de ensaio (3).



Figura 4.4 – Determinação da massa volúmica e absorção do pó de pedra (fotos de autor).

Na Tabela 4.2 encontram-se os resultados das massas volúmicas de cada fração e respetivas absorções.

Tabela 4.2 – Massas volúmicas e absorção dos agregados.

Massas Volúmicas e Absorção - NP EN 1097-6										
Fração	10/16			8/12,5			0/6			Fíler
Amostra	1	2	Média	1	2	Média	1	2	Média	Média
$\rho_a$ (Mg/m <sup>3</sup> )	3,00	3,01	3,00	3,01	3,01	3,01	2,62	2,59	2,60	2,71
$\rho_{rd}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	2,99	2,99	2,99	2,96	2,96	2,96	2,56	2,53	2,54	-
$\rho_{ssd}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	2,99	3,00	3,00	2,97	2,97	2,97	2,58	2,56	2,57	-
% Abs	0,1	0,2	0,1	0,6	0,6	0,6	1,0	1,1	1,1	-

## 4.2. Estudo da Interação Ligante-Aditivo

Para dar início ao estudo de formulação da mistura é necessário estabelecer qual a percentagem de aditivo que demonstra melhores resultados. Segundo a recomendação

do produtor, Sasol Wax GmbH, a percentagem ideal será de 3% em massa de ligante. Assim, serão caracterizadas três amostras de betume PMB 45-80/65 aditivadas com 2% ( $x - 1$ ), 3% ( $x$ ) e 4% ( $x + 1$ ) de Sasobit®, de acordo com a esquematização da Figura 4.5.

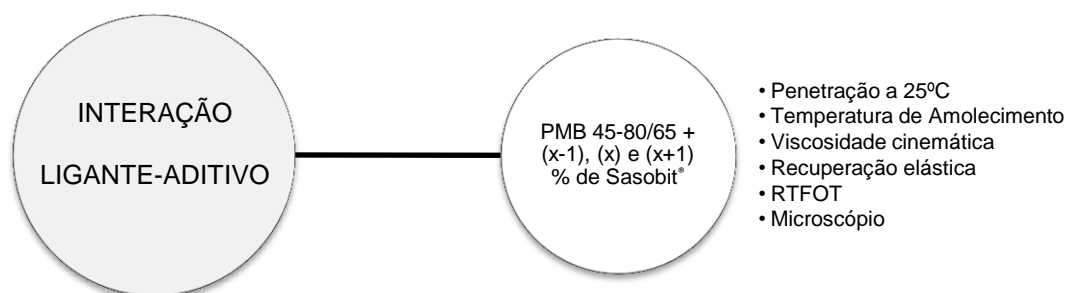


Figura 4.5 – Estudo de caracterização do betume.

Os ensaios de caracterização do betume indicados na esquematização acima foram realizados de acordo com as respetivas normas, devidamente indicadas no subcapítulo 2.2. A análise microscópica pretende avaliar o nível de homogeneização do betume aditivado e, sendo um PMB, visa igualmente verificar a dispersão do polímero e o tamanho e forma das partículas constituintes, de forma a garantir que este apresenta a configuração habitual.

O aditivo Sasobit® é, como já foi mencionado, uma longa e fina cadeia de hidrocarbonetos alifáticos de polimetileno, produzida através da gaseificação do carvão, pelo processo “Fischer-Tropsch”. Define-se como um *asphalt flow improver*, melhorando o fluxo, devido à sua capacidade de reduzir a viscosidade do ligante. Apresenta uma gama de temperaturas de fusão baixa, na ordem dos 70 aos 115 °C, sendo completamente solúvel acima dessa temperatura. Posto isto, e não havendo indicações sobre os procedimentos e a temperatura a que o aditivo deve ser dissolvido no betume, optou-se por misturar o aditivo no betume a uma temperatura de 130 °C, em seguimento do estudo de Ferreira (2009).

Todos os resultados obtidos foram comparados com os do betume de referência, de modo a perceber como as diferentes percentagens de aditivo alteram as características do betume base.

#### **4.2.1. Determinação das Características dos Ligantes**

Na Tabela 4.3 encontram-se as características de referência do betume modificado com polímero – PMB 45-80/65 produzido na ProbiGalp.



Tabela 4.3 – Características de referência do betume PMB 45-80/65 produzido na ProbiGalp.

Propriedades	Norma (s) Regulamentadora (s)	Unidade	Classificação PMB 45-80/65	Valores Limite	
				Mín	Máx
Pen (25°C, 100g, 5s)	EN 1426	0,1 mm	Classe 4	45	80
Temperatura de Amolecimento (AeB)	EN 1427	°C	Classe 5	65	-
Ponto de Fragilidade de Fraass	EN 12593	°C	Classe 7	-	-15
Recuperação Elástica (25°C)	EN 13398	%	Classe 3	70	-
Ponto de inflamação	EN ISSO 2592	°C	Classe 3	235	-
Estabilidade ao Armazenamento – EN 13399					
Diferença no valor da Temperatura de Amolecimento	EN 1427	°C	Classe 2	-	5
Diferença no valor da Penetração	EN 1426	1/10mm	Classe 2	-	9
Após RTFOT – EN 12607-1					
Δ Massa	EN 12607-1	%	Classe 5	-	1,0
Penetração retida	EN 1426	1/10mm	Classe 7	60	-
Aumento da Temperatura de Amolecimento	EN 1427	°C	Classe 3	-	10

Para o betume aditivado com as três percentagens de Sasobit®, atrás mencionadas, determinou-se a penetração a 25°C, a temperatura de amolecimento, a recuperação elástica e a resistência ao envelhecimento (RTFOT). Todos os boletins de ensaio apresentam-se no ANEXO I.

Na Tabela 4.4 apresentam-se as variações de penetração e de temperatura de amolecimento, em termos numéricos e percentuais, do betume aditivado relativamente ao betume de referência.

Tabela 4.4 – Resultados da penetração a 25 °C e da temperatura de amolecimento.

Avaliação Comparativa dos Valores de Penetração e Temperatura de Amolecimento							
Ligante	% Sasobit®	Pen (25°C, 100g, 5s) (1/10mm)	Δ Pen (1/10mm)	Δ Pen (%)	Temperatura de Amolecimento (AeB) (°C)	Δ AeB (°C)	Δ AeB (%)
Betume de Referência	0	55,0	-	-	72,8	-	-
Betume Aditivado	2	52,0	-3,0	5,5	79,2	6,4	8,8
	3	40,0	-15,0	27,3	88,5	15,7	21,6
	4	44,0	-11,0	20,0	83,0	10,2	14,0

No eixo principal do Gráfico 4.3 e 4.4 surge a evolução da penetração e da temperatura de amolecimento consoante a percentagem de aditivo que foi aplicada. No eixo secundário apresenta-se a variação que cada uma destas características sofreu face ao betume de referência.

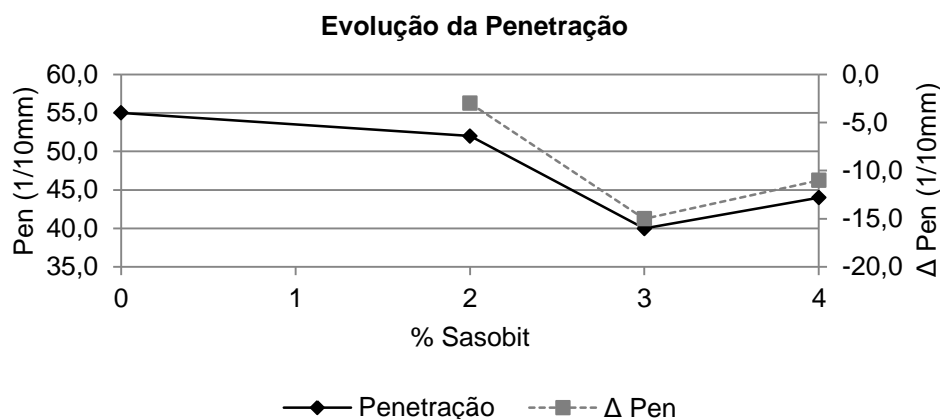


Gráfico 4.3 – Evolução da penetração a 25 °C.

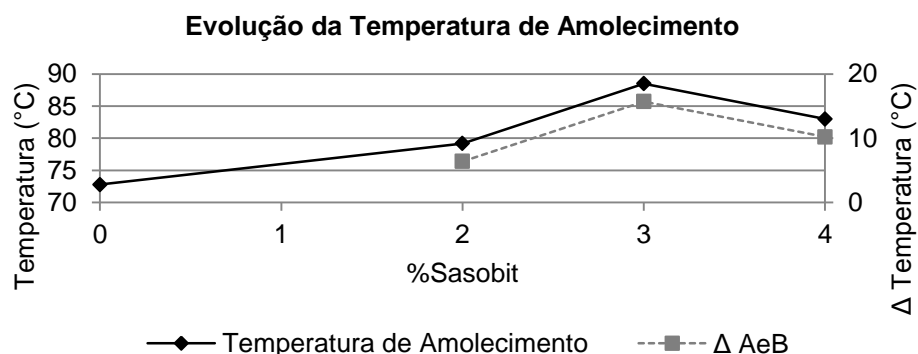


Gráfico 4.4 – Evolução da temperatura de amolecimento.

Da análise do Gráfico 4.3 e 4.4 é possível constatar que apenas a adição de 2% de aditivo garante que o betume se mantenha dentro da gama de penetração estipulada para o PMB 45/80-65, enquanto as percentagens de 3 e 4% modificam-no de tal modo, que este passa a estar dentro da gama de valores referência de um PMB 25/55-65. As temperaturas de amolecimento sofreram um aumento bastante considerável, o que implica o endurecimento do betume.

Na Tabela 4.5 e no Gráfico 4.5 encontram-se os resultados relativos à recuperação elástica das amostras aditivadas com as três percentagens de Sasobit®, as quais foram analisadas relativamente ao limite imposto para o betume de referência.

Tabela 4.5 – Resultados da recuperação elástica.

Avaliação dos Valores de Recuperação Elástica		
Ligante	% Sasobit®	Recuperação Elástica (%)
Betume aditivado	2	88,0
	3	94,0
	4	87,0

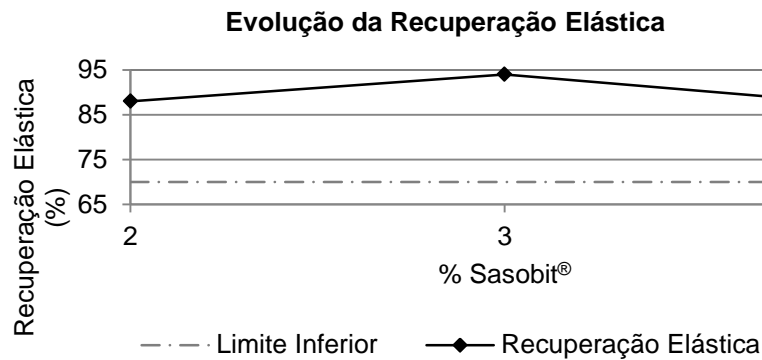


Gráfico 4.5 – Variação da recuperação elástica do betume aditivado.

Da análise do gráfico acima ressalta o facto de nenhuma das percentagens de aditivo ter causado a redução da recuperação elástica abaixo do patamar imposto, de 70% para o PMB 45/80-65.

Na Tabela 4.6, no Gráfico 4.6 e 4.7 encontram-se os resultados relativos ao ensaio de envelhecimento artificial do betume (RTFOT), onde se compararam os valores de penetração retida e de aumento da temperatura de amolecimento relativamente aos limites impostos para o betume de referência.

Tabela 4.6 – Resultados da penetração a 25 °C e da temperatura de amolecimento após RTFOT.

Avaliação dos Valores de Resistência ao Envelhecimento				
Ligante	% Sasobit®	$\Delta$ Massa (%)	Penetração Retida (1/10mm)	Aumento da Temperatura de Amolecimento (°C)
Betume Aditivado	2	-0,01	81,0	0,8
	3	-0,34	63,0	2,0
	4	-0,28	70,0	8,5

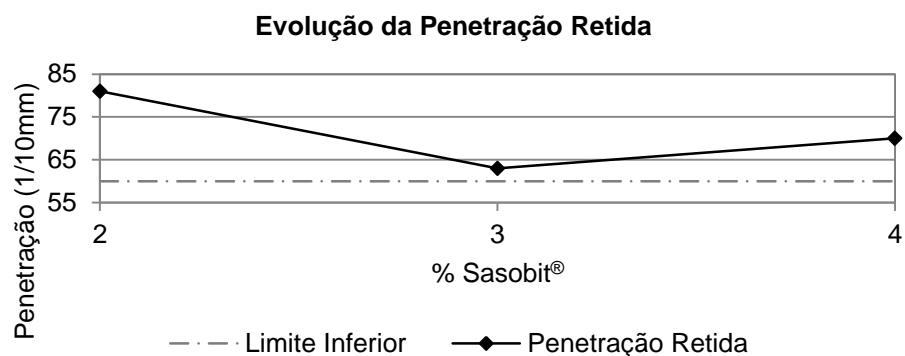


Gráfico 4.6 – Resultados da penetração retida após RTFOT.

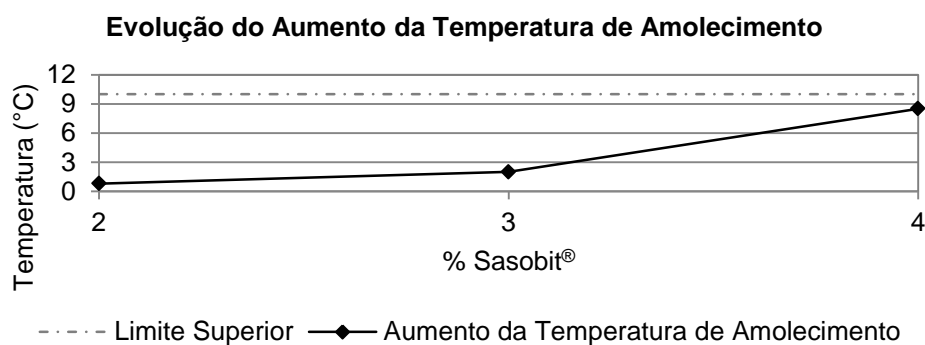


Gráfico 4.7 – Resultados do aumento da temperatura de amolecimento após RTFOT.

Verifica-se, através do Gráfico 4.6 e 4.7, que nenhuma das percentagens de Sasobit® resultou numa retenção de penetração após envelhecimento artificial abaixo dos 60 dmm indicados como limite. Para além disso, nenhuma delas produziu um aumento da temperatura de amolecimento acima dos 10 °C.

Finalmente realizou-se a análise microscópica de uma amostra do betume de referência e de amostras aditivadas com as três percentagens de Sasobit®, cujas ilustrações constam da Figura 4.6, 4.7, 4.8 e 4.9, respetivamente. Todas as amostras foram ampliadas 20x.

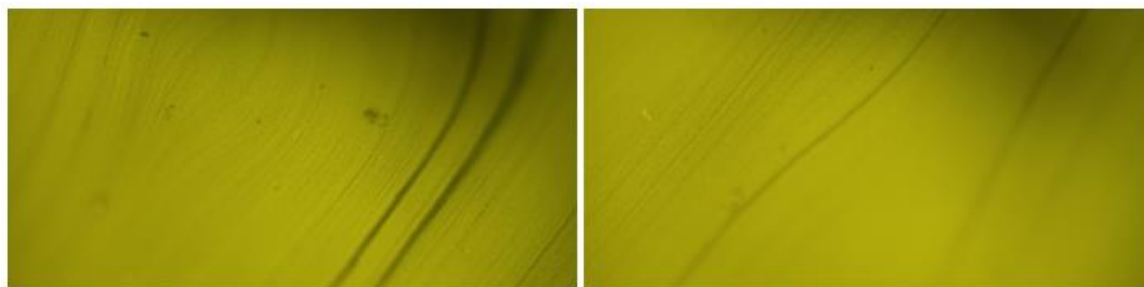


Figura 4.6 – Análise microscópica do betume de referência.

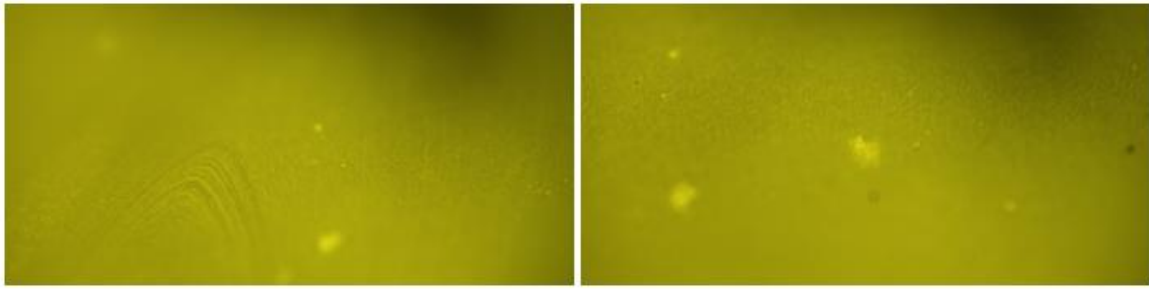


Figura 4.7 – Análise microscópica da amostra de PMB 45-80/65 aditivada com 2% de Sasobit®.

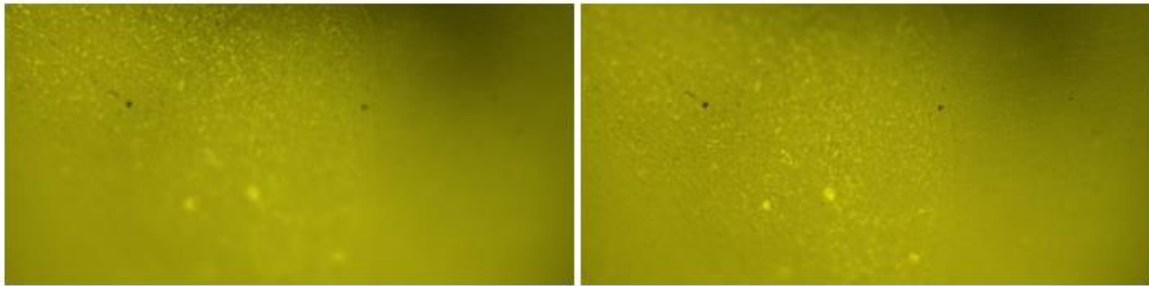


Figura 4.8 – Análise microscópica da amostra de PMB 45-80/65 aditivada com 3% de Sasobit®.

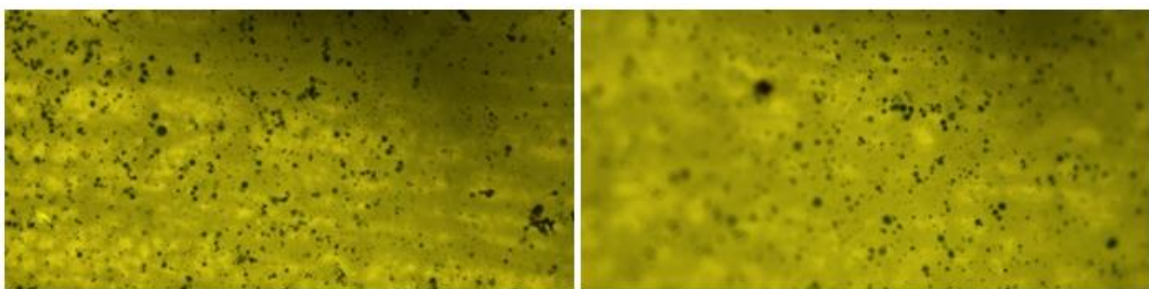


Figura 4.9 – Análise microscópica da amostra de PMB 45-80/65 aditivada com 4% de Sasobit®.

Através da análise microscópica constata-se que o betume de referência, bem como todas as amostras aditivadas com 2, 3 e 4% se encontram em fase contínua de polímero. No betume de referência são evidentes as formas listradas, enquanto nas amostras aditivadas as formas se apresentam arredondadas, de dimensões médias, entre 10 e 100  $\mu\text{m}$ , de acordo com a Norma EN 13632 – *Bitumen and bituminous binders - Visualisation of polymer dispersion in polymer modified bitumen*.

#### **4.2.2. Avaliação da Viscosidade Dinâmica**

Para cada uma das percentagens de aditivo em análise desenvolveu-se um estudo de viscosidade dinâmica, a qual foi posteriormente convertida em viscosidade cinemática. O objetivo destes estudos foi determinar qual a percentagem de Sasobit® que possibilitava a maior redução nas temperaturas de fabrico e compactação.

Realizou-se o ensaio de determinação da viscosidade dinâmica, segundo a Norma Europeia EN 13302 – *Determination of dynamic viscosity of bituminous binder using a rotating spindle apparatus*, de forma a conhecer a evolução da viscosidade ao longo de várias temperaturas de ensaio. O estudo foi realizado numa gama de temperaturas de 50 a 200 °C, de 10 em 10 °C. Foi ainda feita a leitura a 115 °C, o ponto de fusão do aditivo em estudo e a 135 °C, para efeito da conversão em viscosidade cinemática.

A Figura 4.10 esquematiza a determinação da viscosidade dinâmica através de um viscosímetro rotacional. A linha a vermelho indica a evolução teórica da viscosidade caso a temperatura tivesse sido levada sequencialmente de 110 a 170 °C. Em cada patamar a estabilização da temperatura demorou cerca de 21 minutos, dentro do estabelecido na Norma mencionada (15 a 30 minutos). A zona sombreada exemplifica que para a temperatura de 110 °C se obtém uma viscosidade dinâmica de 2,96 Pa.s.

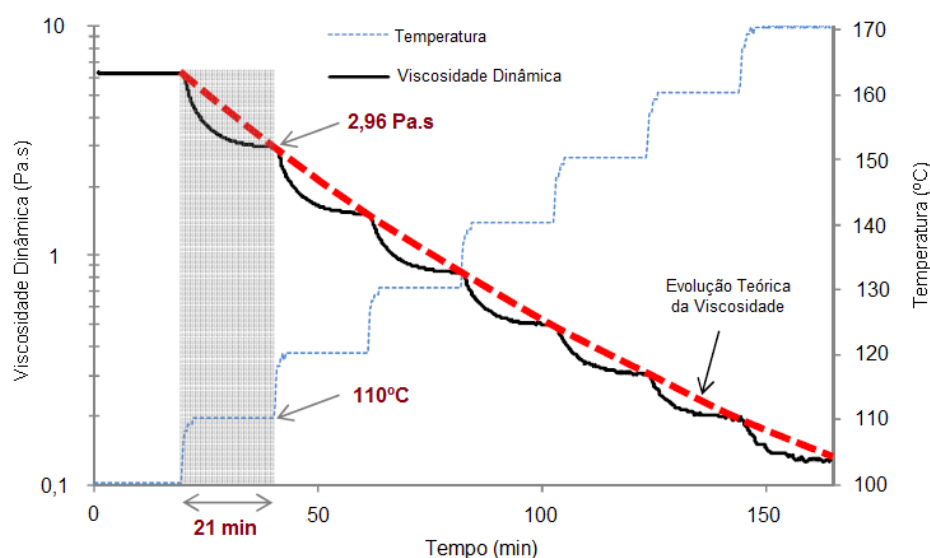


Figura 4.10 – Determinação da viscosidade dinâmica através de um viscosímetro rotacional (Adaptado de Ferreira (2009)).

De acordo com o estipulado na referida Norma, após ser colocada a cápsula na manta de aquecimento e de inserido o *spindle*, aguardam-se entre 15 a 30 minutos até a estabilização da temperatura. Neste caso, iniciou-se o ensaio aplicando 20 rotações por minuto. Pretende-se que o viscosímetro esteja a trabalhar numa gama de esforço de 10% a 90%, caso não esteja, a opção poderá passar por alterar o *spindle*, ou de forma mais imediata, pela alteração das rotações aplicadas. Num período de  $(60 \pm 5)$  s devem ser anotados três valores de viscosidade, sendo o resultado a média desses três.

Tal como foi referido, fez-se a conversão de viscosidade dinâmica, em *Centipoise* (cP), para cinemática, em *Centistokes* (cS), através da Equação 2.2. Para o efeito usou-se como densidade do betume modificado com polímero o valor de  $1,04\text{kg/m}^3$ .

Para determinar a passível redução das temperaturas de fabrico e de compactação da mistura, juntamente com as linhas de tendência da viscosidade introduziram-se os limites de viscosidade cinemática de  $170\pm 20\text{cS}$  para as temperaturas de fabrico e de  $280\pm 30\text{cS}$  para as temperaturas de compactação, como indicado no tópico 15.03.2.2 do CEEP, metodologia comumente designada de método Superpave (Superior Performance Asphalt Pavements) ou de *Equiviscous*.

Desde a década de 60 que se recomenda o uso dos intervalos de viscosidade, como meio de determinação das temperaturas de mistura e compactação, sendo que em 1974 o Asphalt Institute especificou a gama de viscosidade cinemática de  $170\pm 20\text{cSt}$  e de  $280\pm 20\text{cSt}$ , para a temperatura de mistura e de compactação, respetivamente. O projeto Superpave, produto do Strategic Highway Research Program (SHRP), veio vinte anos mais tarde, admitir os mesmos limites de viscosidade, alterando apenas as unidades de cSt para Pa.s (Yildirim *et al.*, 2000).

Este tipo de procedimento fornece resultados satisfatórios para betumes puros, que manifestam comportamento reológico newtoniano<sup>1</sup>, todavia para ligantes modificados, com comportamento não-newtoniano, do tipo “shear thinning”<sup>2</sup> e baixas taxas de corte, traduzem-se em temperaturas elevadas, acima dos  $190^\circ\text{C}$ , o que em termos práticos e ambientais se torna inexequível (Santos, 2011; Yildirim *et al.*, 2000). No ano 2000, o Asphalt Pavement Environmental Council publicou um guia ambiental “Best Management Practices to Minimize Emissions During Construction” onde indicou que a aplicação dos limites de *Equiviscous* para a determinação das temperaturas deve restringir-se apenas ao campo laboratorial, com especial acento nos ligantes modificados (West *et al.*, 2010).

Tendo em conta que se pretendeu conhecer apenas a relação direta de decréscimo entre o betume de referência e o betume aditivado, aplicou-se a metodologia atrás referida, transpondo-se posteriormente essa diminuição para as temperaturas indicadas pelo produtor.

---

<sup>1</sup> Comportamento newtoniano é independente da taxa de corte e/ou tempo de carregamento.

<sup>2</sup> Comportamento não newtoniano é dependente da taxa de corte e/ou tempo de carregamento, para além da temperatura e pressão.

De modo a existirem resultados comparativos, foi determinada a linha de tendência para o betume de referência (Gráfico 4.8), bem como para as três percentagens de aditivo em estudo, de 2, 3 e 4% (Gráfico 4.9, 4.10 e 4.11, respetivamente).

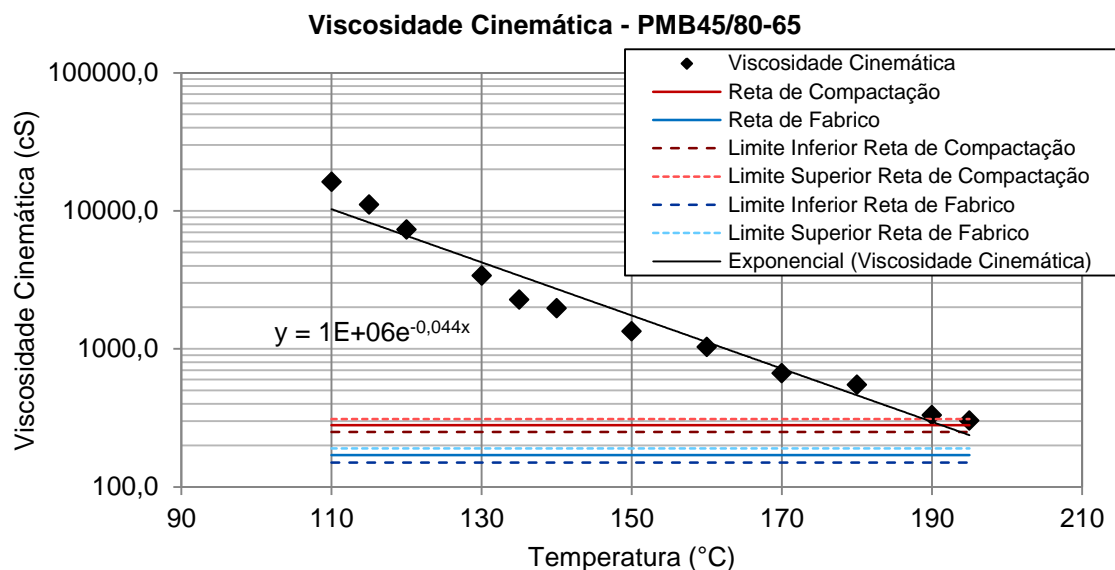


Gráfico 4.8 – Viscosidade cinemática da amostra de PMB 45-80/65.

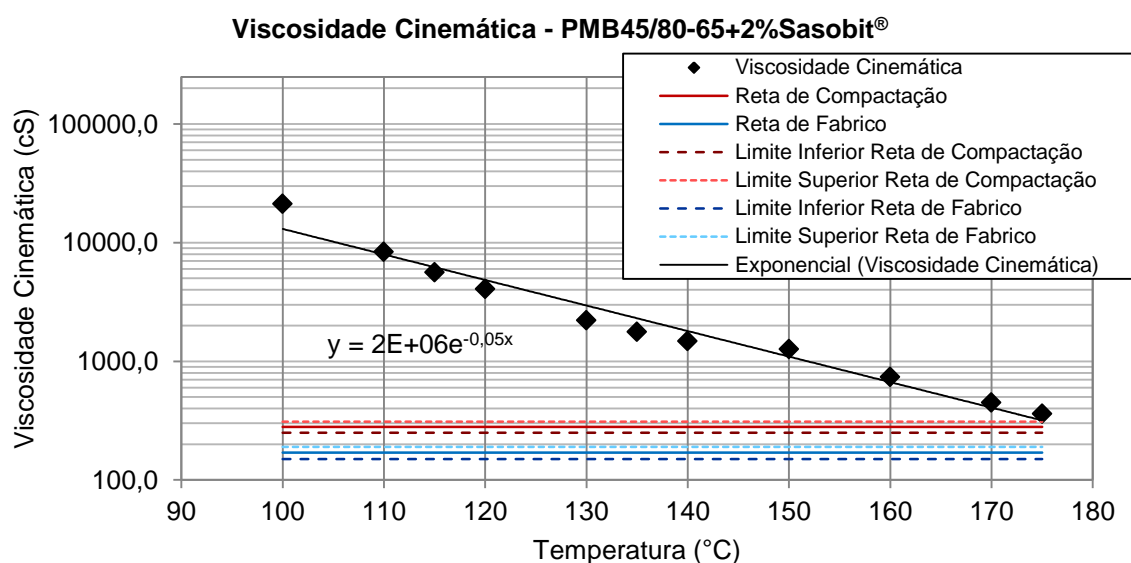


Gráfico 4.9 – Viscosidade cinemática da amostra de PMB 45-80/65 com 2% de aditivo.



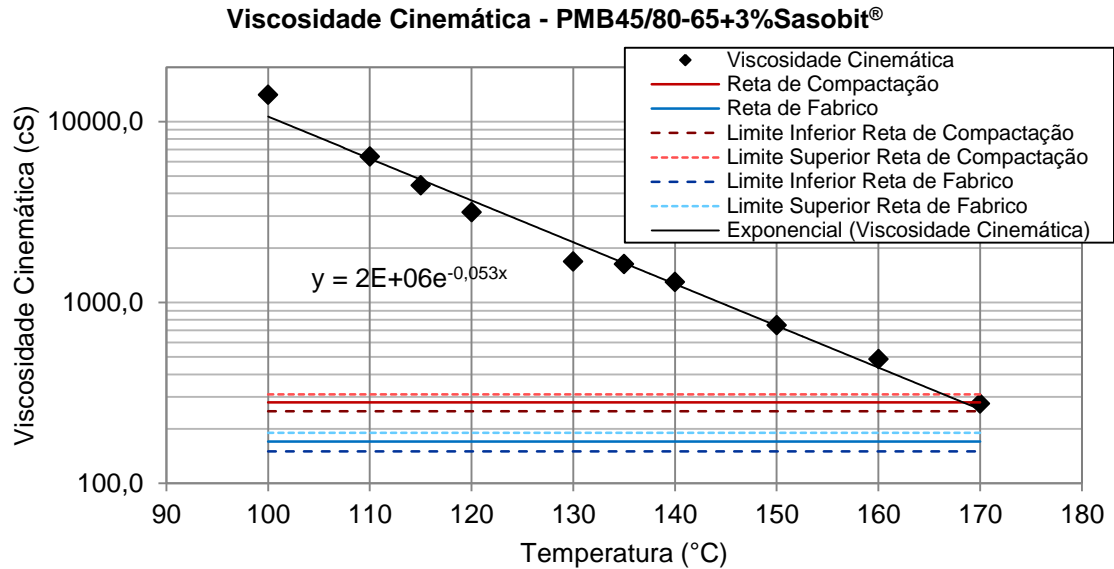


Gráfico 4.10 – Viscosidade cinemática da amostra de PMB 45-80/65 com 3% de aditivo.

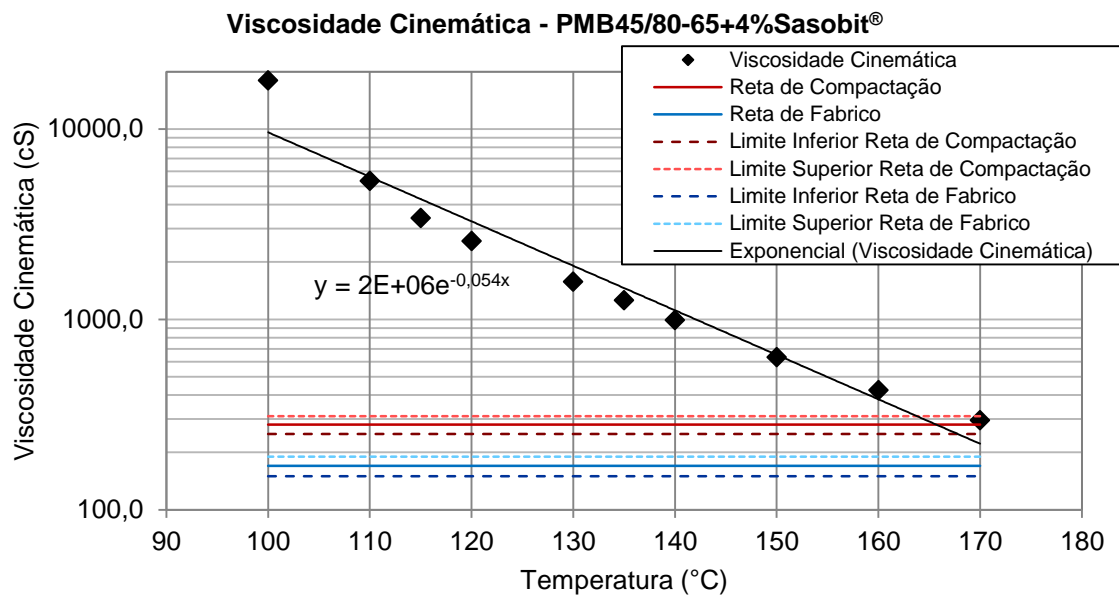


Gráfico 4.11 – Viscosidade cinemática da amostra de PMB 45-80/65 com 4% de aditivo.

No Gráfico 4.12, em eixo principal surge a diminuição progressiva das temperaturas, consoante a percentagem de aditivo adicionada ao betume de referência, enquanto em eixo secundário surge a variação verificada para cada uma das percentagens.

Evolução das Temperaturas de Mistura e Compactação

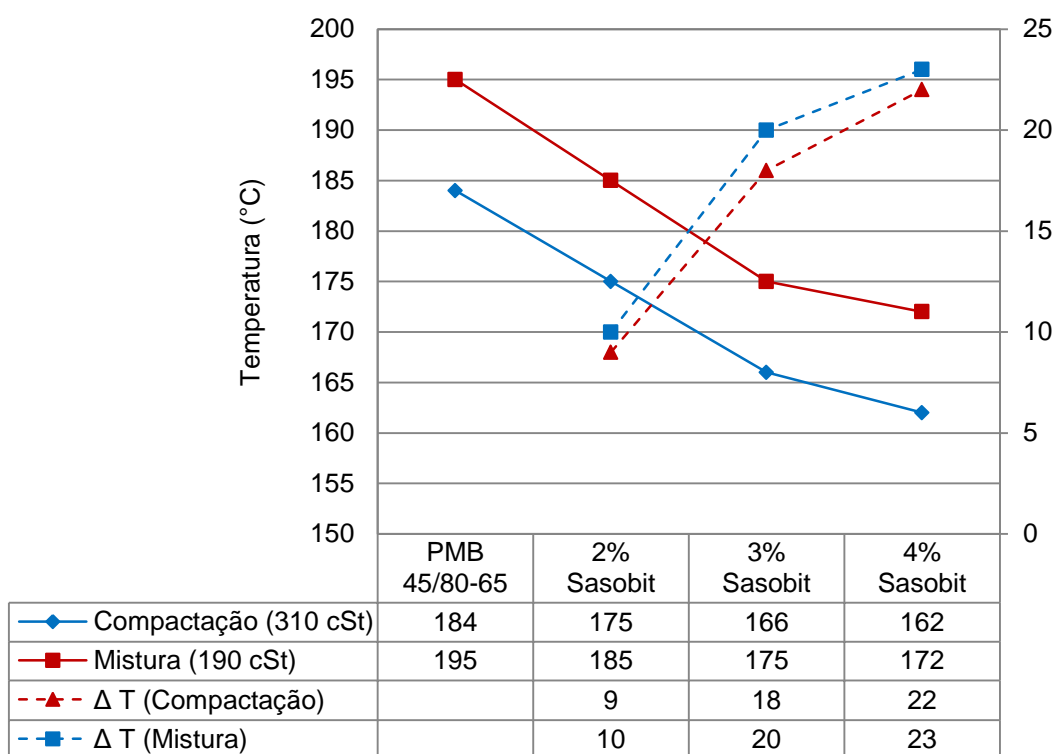


Gráfico 4.12 – Evolução das temperaturas de mistura e compactação sobre efeito das diferentes percentagens do aditivo em estudo.

#### 4.3. Otimização das Temperaturas de Mistura e Compactação

Da análise do Gráfico 4.3 verifica-se que a penetração diminuiu consecutivamente, dando um salto considerável aos 3% e aumentando ligeiramente para os 4%. Para os 2% de Sasobit® o betume mantém-se dentro da gama de valores para um PMB 45/80-65, todavia para os 3 e 4% o aditivo causa de tal forma o endurecimento do betume que o transformando num PMB 25/55-65.

A temperatura de amolecimento (Gráfico 4.4) sofre, em concordância com a penetração, um desenvolvimento correspondente. O valor obtido para os 3%, superior a 87 °C, é característico de betumes duros. Estas alterações nas características básicas do betume sugerem a capacidade do aditivo Sasobit® simular um *blending* de formulação do PMB com um dos betumes base mais duro.

Relativamente à recuperação elástica (Gráfico 4.5) pode considerar-se que todas as percentagens de aditivo garantiram resultados acima do limite superior estipulado, sendo que os 3% geraram o melhor resultado. No ensaio de envelhecimento artificial (Gráfico 4.6 e 4.7) qualquer uma das percentagens assegurou resultados dentro dos

parâmetros, embora, obviamente, os 3 e 4% tenham causado menores retenções de penetração e aumentos da temperatura de amolecimento superiores.

A introdução de percentagens crescentes de aditivo ao betume de referência causa a progressiva diminuição das temperaturas de mistura e compactação, de acordo com o Gráfico 4.12. O maior ressalto ocorre para os 3% de Sasobit®, numa média de 20 °C e para os 4% a diminuição é ligeiramente superior, ou seja, denota-se que apenas a partir da segunda percentagem o decréscimo é significativo.

Com base nos resultados da viscosidade cinemática e dos ensaios das características básicas do betume, optou-se por estabelecer a aplicação de 4% de Sasobit®, para prosseguir o estudo, reduzindo 20 °C nas temperaturas de mistura e compactação.

Ferreira (2009) desenvolveu um estudo onde provou ser exequível a produção de uma mistura AC 14 Surf, reduzindo 20 °C nas temperaturas de mistura e compactação através da aplicação de 4% de Sasobit®. Através do estudo do comportamento reológico, feito com o reómetro de corte dinâmico (DSR) e com o viscosímetro rotacional, determinou ser necessário adicionar a percentagem, tão elevada quanto possível, para assegurar um incremento substancial da parte elástica do módulo de corte complexo do betume, na gama de temperaturas de trabalho, de modo a promover a redução da viscosidade deste. Adicionalmente, para a otimização das temperaturas, realizou um estudo de compatibilidade com diferentes provetes a diferentes energias de compactação, e com o mesmo provete a diferentes energias de compactação, recorrendo ao dispositivo LVDT (*linear variable differential transformer*) (Figura 4.11). Constatou em ambos os estudos que era possível produzir a mistura a 140 °C (menos 20 °C que a convencional) sem problemas volumétricos.

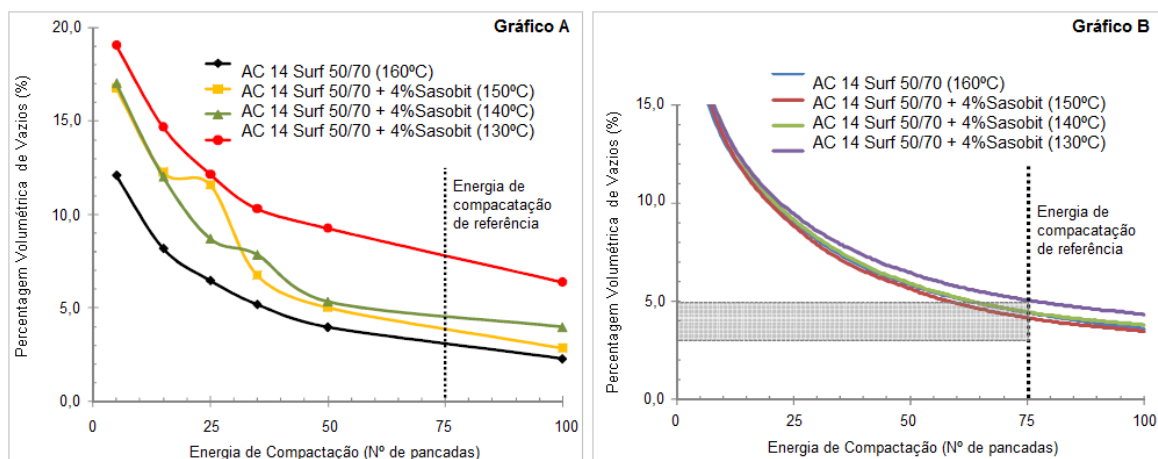


Figura 4.11 – Estudos de compatibilidade com o aditivo Sasobit® (Adaptado de Ferreira (2009)).

Alves (2012) realizou recentemente um estudo, com base no atrás referido, onde produziu uma mistura do tipo AC 20 Base aditivada com 4% de Sasobit® a 120 °C, a qual foi compactada a 100 °C, o que perfaz 40 °C abaixo da temperatura da mistura convencional. Deste trabalho destacam-se os bons resultados ao nível de resistência à deformação permanente.

A literatura dá indicações desta percentagem de aditivo promover resultados satisfatórios, sendo que o produtor indica à partida um mínimo de 3%. De igual modo, a redução de 20 °C não parece chocar com os anteriores trabalhos. A Tabela 4.7 sintetiza as temperaturas de fabrico e compactação que foram aplicadas à MBQ e à MBT.

Tabela 4.7 – Temperaturas de fabrico e compactação das misturas em estudo.

Temperaturas de Fabrico e Compactação Aplicadas à Mistura AC 14 Surf (BBr)				
Mistura	Temperatura do Ligante (°C)	Temperatura dos Agregados (°C)	Temperatura de Mistura (°C)	Temperatura de Compactação (°C)
Mistura aditivada com 4% de Sasobit®	150	150	150	140
Mistura Padrão	170	170	170	160

#### 4.4. Estudo de Marshall – Percentagem Ótima de Betume

Depois de determinada a granulometria dos agregados, a percentagem de cada um destes que garante o encaixe da curva da mistura dentro dos fusos estipulados no CEEP e de garantir as características físicas dos agregados, iniciou-se o estudo de Marshall, com vista à determinação do teor de betume que assegura as melhores características para a mistura em causa.

Em 1948 o U.S. Army Corps of Engineers (USCOE) fez melhoramentos à atual metodologia de Marshall, cujos conceitos básicos iniciais foram desenvolvidos por Bruce Marshall, técnico do Departamento de Estradas do Estado do Mississippi, por volta de 1939 (Tatic *et al.*, 2006). Esta metodologia foi standardizada pela American Society for Testing and Materials como ASMT D-1559: *Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures using Marshall Apparatus* (Alshamsi, 2006). As vantagens imediatas deste método são requerer equipamento relativamente barato, o tempo de execução ser curto face a outros e a análise volumétrica ajudar a garantir a durabilidade do material. Todavia, este falha grosseiramente devido ao facto da compactação dos provetes não simular a densificação sofrida num pavimento real. Além disso a determinação da estabilidade não assegura que a mistura tenha a devida resistência ao fendilhamento (Alshamsi, 2006).

Esta metodologia pressupõe o fabrico de 5 conjuntos de pelo menos 3 provetes cilíndricos cada, variando de 0,5% a percentagem de betume entre si, face à massa total, sendo que dois desses devem estar abaixo da dita percentagem ótima e os outros dois acima.

Segundo o CEEP – Quadro 14.03.2n para uma mistura do tipo AC 14 Surf (BBr) a percentagem mínima de ligante a introduzir é de 4,0%. Assim, neste estudo foram testadas as percentagens 4.0, 4.5, 5.0, 5.5 e 6.0.

De cada mistura são fabricados pelo menos três provetes, compactados com 75 pancadas em cada face, sendo reservada parte da mistura para a determinação da máxima baridade teórica, de acordo com a EN 12697-5. De seguida os provetes são ensaiados à compressão na prensa de Marshall, a uma temperatura de 60 °C e uma velocidade de deformação de 50 mm/min, de forma a obter os valores de força de rotura e deformação, segundo a NP EN 12697-34.

Em suma, para cada conjunto de provetes é determinada a estabilidade, a deformação, a máxima baridade teórica, a baridade, de acordo com a NP EN 12967-6 (Procedimento C –  $\rho_{b\text{sea}}$ ), para se obter a porosidade e o volume de vazios na mistura de agregados (VMA). Esses parâmetros devem estar dentro dos limites estabelecidos no CEEP para este tipo de mistura (Tabela 4.8).

Tabela 4.8 – Especificações da mistura do tipo AC14 Surf (BBr) (EP, 2009).

Limites das Especificações (quadro 14.03.2n)					
Limites	n (%)	VMA (%)	Estabilidade (kN)	Deformação (mm)	Quociente de Marshall
Mínimo	3	14	12,5	2	3
Máximo	6	-	15	4	-

A percentagem ótima de betume corresponde à média entre as percentagens de betume que garantem a máxima estabilidade, a máxima baridade e o valor médio entre os limites da porosidade (Equação 4.5), tendo este valor de respeitar os limites exigíveis para a deformação e para o VMA.

$$P_b = \frac{P_b(S_{m\acute{a}x}) + P_b(\rho_{mv}) + P_b(\text{Média dos limites de porosidade})}{3}$$

Equação 4.5

Sequencialmente, os procedimentos da formulação foram os seguintes:

- i. Fabrico da mistura no misturador automático;



Figura 4.12 – Fabrico da mistura (fotos de autor).

- ii. Estabilização da mistura dentro do tabuleiro para posterior acerto das massas diretamente nos moldes, os quais foram novamente estabilizados à temperatura de compactação;

- iii. Compactação dos moldes com recurso a um compactador de impacto;



Figura 4.13 – Compactador de impacto (fotos de autor).



Figura 4.14 – Provetes compactados (fotos de autor).

- iv. Fragmentação da mistura para a determinação da máxima baridade teórica;



Figura 4.15 – Determinação da máxima baridade teórica (fotos de autor).

- v. Determinação do teor de betume introduzido na mistura através do método de inceneração;



Figura 4.16 – Determinação do teor de betume através do método de incineração (fotos de autor).

- vi. Após o arrefecimento da mistura procedeu-se à sua desmoldagem;



Figura 4.17 – Desmolde dos provetes (fotos de autor).

- vii. Medição das dimensões dos provetes com auxílio de um paquímetro;

- viii. Determinação da baridade dos provetes através do método do provete selado;



Figura 4.18 – Determinação da baridade dos provetes (fotos de autor).



- ix. Introdução dos provetes no banho a 60 °C durante 40 a 60 min e realização do ensaio de compressão na prensa de Marshall.



Figura 4.19 – Prensa de Marshall e rebentamento de um provete (fotos de autor).

Na Tabela 4.9 encontra-se a síntese dos resultados, que permitem a determinação da percentagem ótima de betume para a mistura em estudo. De acordo com o estipulado pelo CEEP, essa percentagem é obtida através da média entre a percentagem correspondente à máxima baridade dos provetes (Gráfico 4.14), à máxima estabilidade (Gráfico 4.15) e à média dos limites de porosidade (Gráfico 4.13).

Tabela 4.9 – Síntese de resultados do Estudo de Marshall.

Percentagem Ótima de Betume (%)					
% Betume	$\rho_{b\text{sea}}$ (g/cm <sup>3</sup> )	n (%)	VMA (%)	Força de Rótura (kN)	Deformação (mm)
4,0	2,493	6,5	16,2	15,6	3,3
4,5	2,510	4,9	15,9	14,4	4,8
5,0	2,501	3,6	15,8	13,0	4,5
5,5	2,493	3,1	16,4	11,6	6,9
6,0	2,481	2,5	17,0	9,7	10,5



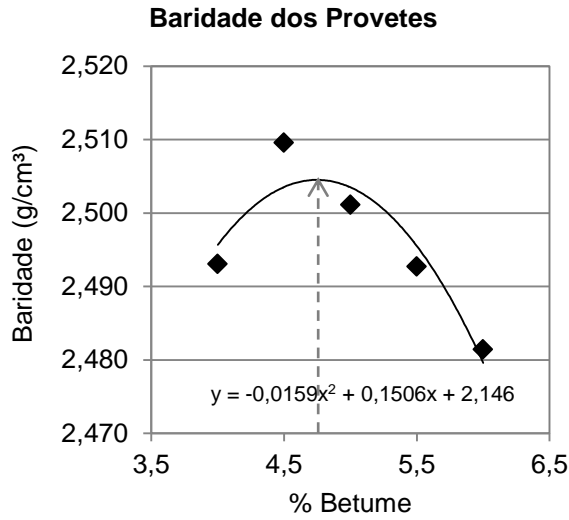


Gráfico 4.14 – Baridade dos provetes

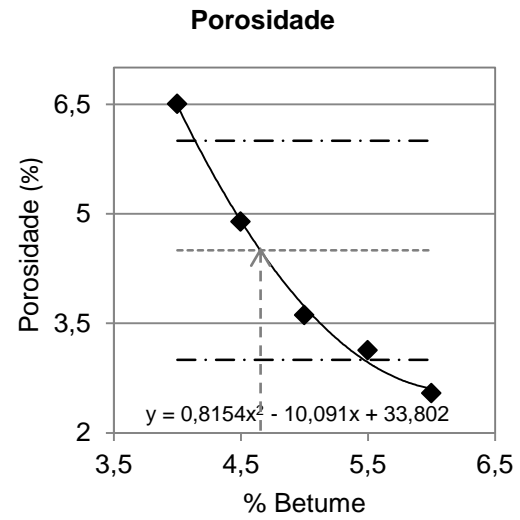


Gráfico 4.13 – Porosidade dos provetes.

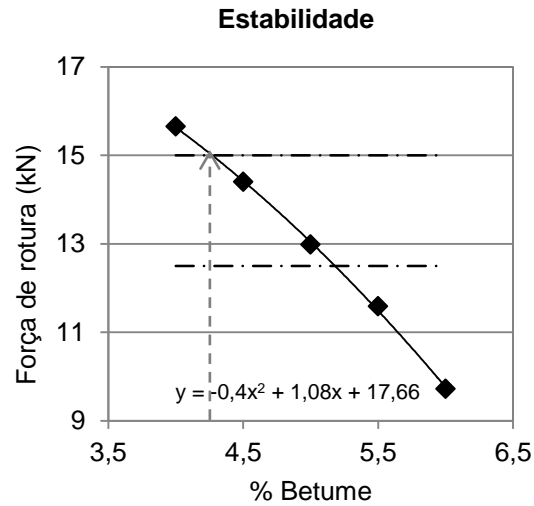


Gráfico 4.15 – Força de rotura dos provetes.

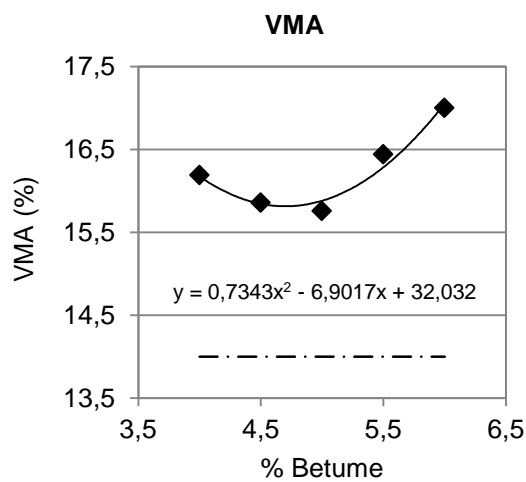


Gráfico 4.17 – VMA dos provetes.

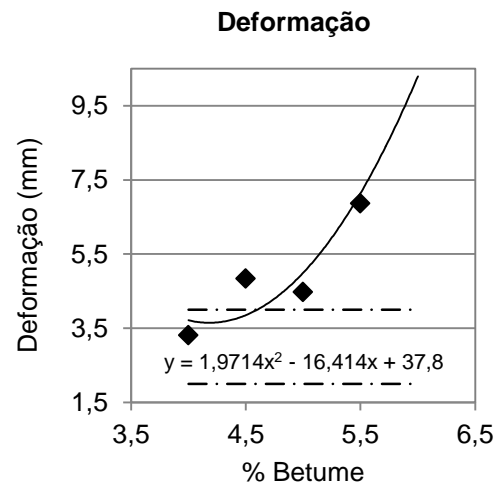


Gráfico 4.16 – Deformação dos provetes.

De acordo com os resultados obtidos e a Equação 4.5, o teor percentagem ótima de betume é de 4,6%. A percentagem ótima obtida considera-se válida se o volume de vazios do esqueleto de agregado e a deformação correspondentes a esse ponto estiverem dentro dos limites impostos no CEEP (Tabela 4.8). Através do Gráfico 4.17 e 4.16, respetivamente, constata-se que o VMA correspondente à percentagem de 4,6% é de 15,8%, superior ao limite de 14% e que a deformação nesse mesmo ponto é de 4,0 mm, valor que se encontra, ainda que marginalmente, dentro dos limites estipulados.

#### **4.4.1. Análise e Discussão dos Resultados**

A determinação da percentagem ótima de PMB para o betão betuminoso rugoso revelou-se uma tarefa bastante complicada e desafiante, possivelmente devido ao grau de sensibilidade do tipo de mistura, a qual apresenta limites de formulação (ANEXO D), segundo o CEEP, bastante apertados. Limites esses que, por diversas vezes, impediram o estabelecimento definitivo dos parâmetros da formulação.

Estabilidade, deformação e porosidade foram parâmetros difíceis de obter e sobretudo de conciliar. A fixação das percentagens granulométricas, sobretudo a percentagem de fíler, a qualidade do agregado grosso inicial, que possuía um índice de forma demasiado desfavorável, apresentando uma textura micácea, bem como a metodologia correta para a determinação da baridade dos provetes foram alguns dos problemas encontrados.

Todas as alterações, metodologias adotadas e considerações tecidas encontram-se sucintamente descritas no ANEXO F.

#### **4.5. Caracterização das Misturas**

De modo a validar a aplicação do aditivo orgânico Sasobit®, como meio de redução das temperaturas de fabrico e compactação, sem comprometimento das características exigíveis à mistura, procedeu-se à caracterização comparativa da mistura betuminosa temperada face à mistura padrão.

##### **4.5.1. Máxima Baridade Teórica**

A máxima baridade teórica foi determinada segundo o procedimento volumétrico, de acordo com a Norma EN 12697-5. Foram seguidos os passos mencionados no subcapítulo 3.3.1 e calculado o valor através da Equação 3.1.

Apresentam-se os resultados para a MBQ e para a MBT na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Determinação da Máxima Baridade Teórica da MBQ e da MBT (BBr).

<b>Máxima Baridade Teórica</b>				
EN 12697-5 – Procedimento A (Volumétrico)				
Parâmetro		Unidade	MBQ	MBT
Massa do picnómetro + tampa	m1	(g)	6744,0	6744,0
Massa do picnómetro + tampa + água	m4	(g)	18424,0	18425,3
Massa do picnómetro + tampa + amostra	m2	(g)	7996,7	8578,0
Massa do picnómetro + tampa + amostra + água	m3	(g)	19196,9	19548,4
Temperatura do líquido	-	(1°C)	26,4	23,5
Massa volúmica do líquido à temperatura do ensaio	$\rho_w$	Mg/m <sup>3</sup>	0,9996	1,0004
Volume do picnómetro	V <sub>Pt</sub>	m <sup>3</sup>	0,0117	0,0117
Densidade máxima	$\rho_{bssd}$	Mg/m <sup>3</sup>	2,632	2,619

#### 4.5.2. Sensibilidade à Água

Para a determinação da sensibilidade à água seguiram-se as premissas das Normas EN 12697-12 e EN 12697-23. A divisão dos provetes em subgrupo húmido e seco, de acordo com as suas dimensões e baridades (Figura 4.20(1)) (ANEXO G.1 e G.2), a aplicação de pressão residual nos poros (Figura 4.20(2)), os períodos de acondicionamento, assim como todo o procedimento sequencial, foi descrito em 3.3.2.



Figura 4.20 – Determinação da baridade dos provetes e aplicação de vácuo ao subgrupo húmido (fotos de autor).

Após o referido período de acondicionamento, os dois conjuntos, de ambas as misturas, foram ensaiados à tração indireta, com recurso ao estabilómetro, de acordo com a Figura 4.21.

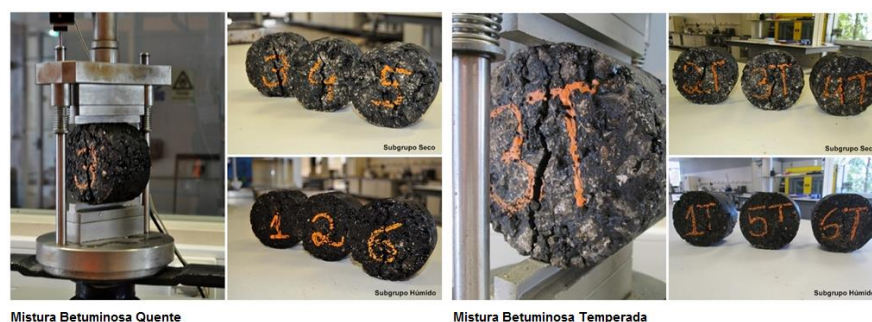


Figura 4.21 – Determinação da resistência à tração indireta da MBQ e da MBT (fotos de autor).

Os resultados de obtidos para a MBQ e para a MBT encontram-se na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Resultados da Sensibilidade à Água (BBr).

Sensibilidade à Água				
EN 12697-12/EN 12697-23				
Mistura	MBQ		MBT	
Subgrupo	Seco	Húmido	Seco	Húmido
Pi (kN)	24,411	21,653	23,246	17,292
ITS	0,002	0,002	0,002	0,002
Tipo de rotura	c	c	c	C
ITSR (%)	88		74	

Do ensaio resultou uma taxa de resistência à tração indireta de 88% para a MBQ e de 74% para a MBT. Todos os subgrupos, quer de uma mistura, quer de outra, apresentaram uma rotura do tipo c, designada de “combinação”, ou seja, as amostras formaram uma linha de rotura limitada pelas áreas onde a carga esteve a atuar, tal como demonstra a Figura 4.22.

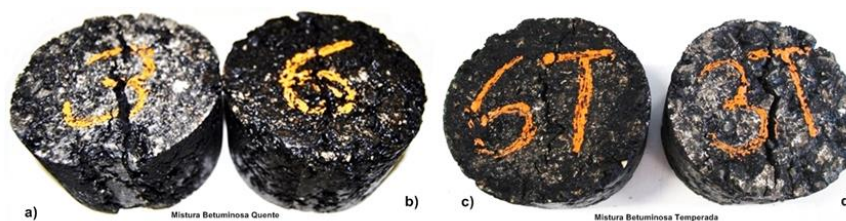


Figura 4.22 – Tipo de rotura manifestado pelos provetes – tipo c (subgrupo seco – a e d, subgrupo húmido – b e c) (fotos de autor).

#### 4.5.3. Resistência à Deformação Permanente

O ensaio de pista foi conduzido de acordo com as premissas da Norma EN 12697-22. Todos os procedimentos de ensaio foram atrás mencionados, no subcapítulo 3.3.3, desde a moldagem e serragem das placas, à determinação das dimensões e baridades dos provetes (Figura 4.23) (ANEXO H.1 e H.2).



Figura 4.23 – Determinação das baridades dos provetes para o ensaio de Pista (fotos de autor).

Depois de devidamente preparados, os provetes foram colocados no interior do dispositivo (Figura 4.24), sobre a mesa de ensaio, devidamente fixados e centrados de forma a obter um rastreamento simétrico, sendo acondicionados a 60°C durante 6h. No final desse período o braço de suporte da roda foi baixado, até se encontrar a nível e foi verificada a estabilidade do sensor de deformação. Inicialmente o equipamento faz 5 ciclos de carga, de modo a que seja possível verificar algum problema, só depois decorre o ensaio, que prossegue até aos 10000 ciclos de carga ou é interrompido se a rodeira atingir os 20 mm de profundidade.



Figura 4.24 – Equipamento do ensaio de Pista (roda de rastreamento, nível e sensor de deformação) (foto de autor – laboratório NIDIN).

Os resultados do ensaio encontram-se sintetizados na Tabela 4.12, bem como no Gráfico 4.18, que ilustra a evolução da rodeira em cada uma das misturas, cujos valores se apresentam no ANEXO H.3. A partir da Figura 4.25 é possível constatar o aspeto das rodeiras de cada uma das misturas.

Tabela 4.12 – Síntese dos resultados do ensaio de Pista.

Resistência à Deformação Permanente		
EN 12697-22		
Resultado	Mistura	Valor médio
WTS <sub>AIR</sub> (mm/10 <sup>3</sup> ciclos de carga)	MBQ	0,274
	MBT	0,068
PRD <sub>AIR</sub> (% 1E4 ciclos de carga)	MBQ	7,8
	MBT	4,7
RD <sub>AIR</sub> (mm 1E4 ciclos de carga)	MBQ	4,69
	MBT	2,81

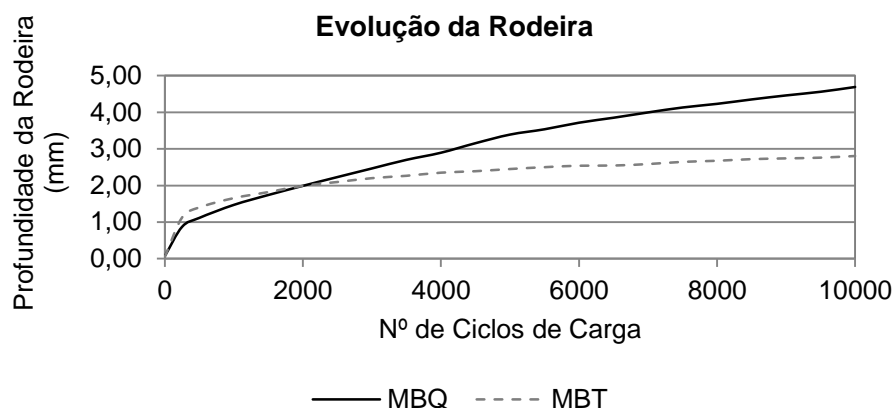


Gráfico 4.18 – Evolução da rodeira ao longo do ensaio.

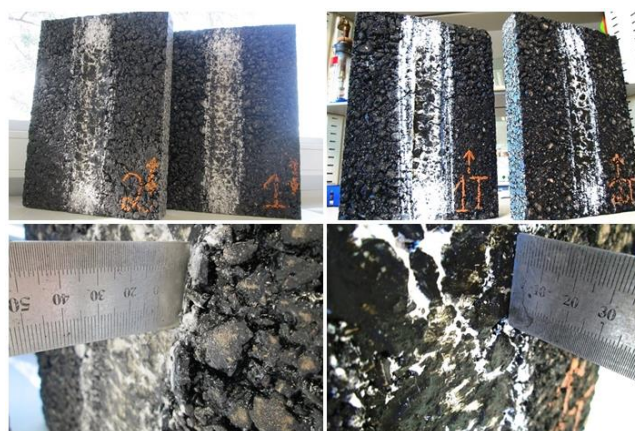


Figura 4.25 – Aspeto e profundidade das rodeiras da MBQ e da MBT (fotos de autor).

#### 4.6. Discussão dos Resultados

Comparam-se neste estudo duas misturas betuminosas do tipo AC 14 Surf (BBr), uma delas produzida a 170 °C e compactada a 160 °C, as temperaturas ditas convencionais, indicadas pelo produtor, com uma outra mistura produzida a 150 °C e compactada a 140 °C. Esta redução de temperaturas foi obtida através da introdução de 4% do aditivo Sasobit® ao betume PMB 45/80-65. Portanto, o objetivo desta análise, para além de passar por tentar comprovar que a mistura temperada apresenta um desempenho equivalente à mistura convencional, passa também por validar o uso do referido produto como meio redutor das temperaturas de fabrico e compactação.

A Tabela 4.13 sintetiza todos os resultados dos ensaios realizados à MBQ e à MBT, de modo a ser mais simples formulação comparações entre estas.

Tabela 4.13 – Síntese dos resultados obtidos para a MBQ e para a MBT.

Comparação do Desempenho das Misturas em Estudo			
Tipo de Mistura		AC 14 Surf (BBr)	
Mistura	-	MBQ	MBT
Betume	-	PMB 45/80-65	PMB 45/80-65 com 4% de Sasobit®
Percentagem de Betume	%	4,6	4,6
Temperatura de fabrico/compactação	°C	170/160	150/140
Máxima Baridade Teórica	Mg/m <sup>3</sup>	2,633	2,619
Sensibilidade à Água (ITSR)	%	88	74
Resistência à Deformação Permanente			
WTS <sub>AIR</sub>	mm/10 <sup>3</sup> ciclos de carga	0,274	0,068
PRD <sub>AIR</sub>	% 1E4 ciclos de carga	7,8	4,7
RD <sub>AIR</sub>	mm 1E4 ciclos de carga	4,69	2,81

Constata-se que as misturas apresentam uma baridade semelhante, como expectável, porque a quantidade de aditivo introduzida e o seu peso volúmico não permitiram nenhuma alteração considerável.

Relativamente à Sensibilidade à Água é notório um comportamento bastante superior por parte da mistura convencional. Verifica-se uma redução da taxa de resistência à tração indireta de 88%, da mistura padrão, para 74%, da mistura temperada. Existem vários fatores que poderão ter conduzido à diminuição de resistência, nomeadamente o facto do aditivo Sasobit® se tratar de um produto de natureza orgânica, que em contato com a água poderá causar a instabilização da mistura, e às temperaturas mais baixas de fabrico e compactação, que poderão gerar uma configuração diferente dos vazios, um menor encaixe e imbricamento entre os agregados e mesmo uma ligação agregado-betume mais ténue.

Hurley e Prowell (2005b) concluíram que as misturas que estudaram contendo Sasobit® ostentaram menores resistências à tração indireta que as misturas de controlo, devido às propriedades anti-envelhecimento do aditivo. Admitiram também que a redução das temperaturas de fabrico aumenta a suscetibilidade da mistura ao efeito da humidade. A secagem dos agregados pode não ser completa, permitindo que moléculas de água permaneçam no interior deste, instabilizando depois a mistura. Embora possa não ser indicativo, num estudo desenvolvido em Portugal, onde foi analisado o comportamento de uma mistura betuminosa temperada do tipo AC 20 com introdução de 4% Sasobit®, constatou-se também uma redução bastante significativa da taxa de resistência à tração indireta, de 74% na mistura convencional para 42% na mistura temperada (Alves, 2012).



Relativamente ao ensaio de Pista, que determina a resistência do material à deformação permanente, é possível afirmar que o comportamento da MBT é muito superior ao da MBQ. Todos os parâmetros que caracterizam o ensaio indicam uma melhoria de desempenho da mistura com adição de Sasobit® relativamente à mistura padrão, nomeadamente a média proporcional da profundidade da rodeira ( $PRD_{AIR}$ ) e a profundidade média da rodeira ( $RD_{AIR}$ ) que sofrem redução bastante considerável.

A média da deformação permanente ao ar ( $WTS_{AIR}$ ) é muito inferior para a mistura temperada. Verifica-se do Gráfico 4.18 que a partir do patamar onde a mistura já sofreu densificação, e que a deformação permanente é fruto dos esforços de corte impostos pelos rodados, que a velocidade de deformação é quase constante para a MBT, enquanto na MBQ sofre um aumento exponencial. Estes resultados vêm em linha com o gráfico da Figura 2.20, que corresponde a um estudo sobre o comportamento de misturas aditivadas com Sasobit® em ambiente de tráfego pesado. Tal como neste estudo, a mistura padrão apresenta uma rodeira que se desenvolve de forma exponencial da fase de corte do ensaio, enquanto a rodeira da mistura temperada apresenta um desenvolvimento quase linear.

Importa referir que a imposição de 60 °C como temperatura, supostamente representativa da condição climática mais desfavorável para Portugal, poderá conduzir a resultados pouco fiáveis, devido às mudanças climáticas sofridas no planeta ao longo dos últimos anos, que exigem uma revisão das condições de ensaio impostas.



## CAPÍTULO 5

### ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÓMICA E DE IMPACTE AMBIENTAL

---



## 5. ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÓMICA E DE IMPACTE AMBIENTAL

Estima-se serem produzidas anualmente cerca de 1500 milhões de toneladas de misturas betuminosas em todo o mundo, na distribuição percentual indicada na Figura 5.1 (EAPA, 2007).

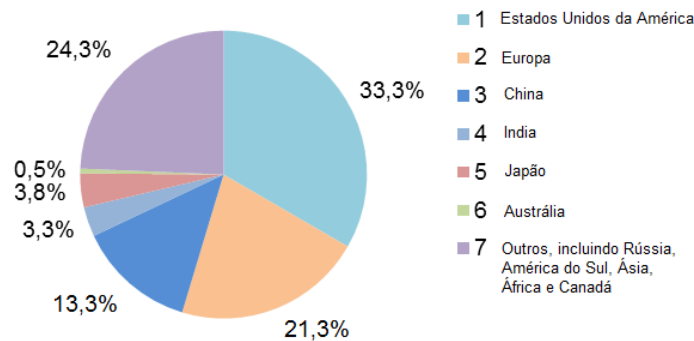


Figura 5.1 – Produção anual de misturas betuminosas em todo o mundo (Adaptado de EAPA (2007)).

As misturas betuminosas temperadas surgiram como solução para reduzir os custos e elevadas emissões poluentes das centrais de fabrico de misturas betuminosas a quente.

Um dos fatores que mais inflaciona o custo de produção de uma central betuminosa é a percentagem de humidade dos agregados. O gasto energético na sua secagem e posterior aquecimento depende do calor específico da água e dos próprios agregados, sendo que pelo menos 100 °C serão necessários, por ser o ponto de ebulição da água. Este processo é intensivo, podendo ser gastos 10 litros de combustível para atingir os 160 °C e secar 5% de humidade a uma tonelada de agregado. Por outro lado, a temperatura de aquecimento do betume depende das suas características básicas, ou seja, de acordo com estas variará o gasto energético despendido no seu aquecimento. A temperatura de aquecimento do ligante tem necessariamente de garantir uma viscosidade que permita o correto envolvimento dos agregados (Gillespie, 2012).

O rendimento está também associado à qualidade dos equipamentos de aquecimento de uma central. Os aquecedores devem ter uma eficiência térmica de pelo menos 80%, sobretudo se o trabalho da central se mantém durante todo o ano. A utilização de isolamento com uma espessura razoável é uma das soluções para impedir as perdas de calor desde o armazenamento ao bombeamento (May *et al.*, 1999).

Os combustíveis usados numa central determinam-se de acordo com a sua disponibilidade e com o custo por calor específico produzido, sendo que atualmente a

quantidade de emissões produzidas é um fator relevante a ponderar. Gás natural e os fuelóleos N°1<sup>3</sup> e N°2<sup>4</sup> são os mais indicados para os secadores e aquecedores, produzindo baixos níveis de emissões. Usam-se pré aquecedores, sobretudo quando se usam os fuelóleos N°5<sup>5</sup> e N°6<sup>6</sup>, nos secadores de agregados, que permitem reduzir a viscosidade do combustível de modo a que este seja atomizado.

Existem dois valores que caracterizam a quantidade de calor que determinado combustível pode produzir, o LHV (poder calorífico inferior), o valor líquido ou útil de calor produzido, e o HHV (poder calorífico superior), o valor bruto de calor produzido. A diferença entre estes dois deve-se ao hidrogénio do combustível, que se perde sob a forma de vapor de água ou humidade. A maioria dos representantes apresenta valor de poder calorífico sem indicar de qual se trata. Geralmente assume-se como o HHV, embora para o cálculo dos custos dos combustíveis seja mais correto usar os valores de LHV (May *et al.*, 1999).

Segundo Stotko (2011), numa central betuminosa, a grande fatia do consumo energético é a secagem dos agregados, cerca de 60%, enquanto a evaporação da água dos agregados requerer 25% do consumo total, variando com a percentagem de humidade contida. Este autor realizou um estudo onde avaliou uma central que produz 100 toneladas por hora e consome cerca de 300MJ/ton de energia por mistura, chegando à conclusão que a implementação de sistemas que permitam a produção de misturas betuminosas temperadas significaria uma poupança de 8400GJ/ano no consumo de fuelóleo, o que se traduziria numa redução de 2280 ton/ano de emissões de CO<sub>2</sub>.

O fabrico de misturas betuminosas temperadas numa central foca-se numa questão fundamental, os custos de manter a temperatura são muito inferiores aos custos de aquecimento. A Tabela 5.1 mostra como, de forma significativa, é necessário despende muito mais calor e combustível para aumentar 25 °F, do que manter a temperatura nos 300 °F, o mesmo que cerca de 150 °C. Constata-se que para aumentar a temperatura se despende mais de três vezes a energia necessária para a manter, proporcional ao gasto em combustível.

---

<sup>3</sup> Fuelóleo N°1 é um óleo volátil destilado destinado para a vaporização em queimadores.

<sup>4</sup> Fuelóleo N°2 é um óleo destilado destinado ao aquecimento doméstico.

<sup>5</sup> Fuelóleo N°5 é um óleo industrial do tipo residual, que requer um pré aquecimento a 170-220 °F (77-104 °C) para a atomização adequada dos queimadores.

<sup>6</sup> Fuelóleo N°6 é um óleo do tipo residual de alta viscosidade, que requer pré aquecimento a 220-260 °F (104-127 °C)

Tabela 5.1 – Comparação entre a energia necessária para manter ou aumentar a temperatura do betume (May *et al.*, 1999).

Energia Necessária	Aumento de 25 °F	Manter a temperatura em 300 °F
Calor específico (Btu)	4127810	1127810
Fuelóleo (Galões)	31,3	8,5

Um terço do consumo mundial de energia é gasto pelas indústrias em geral, e este valor tende a aumentar. A eficiência de produção tem vindo a melhorar, o que significa menor uso de combustíveis fósseis e, por conseguinte, redução da emissão de GEE (gases de efeito de estufa) pelos países desenvolvidos, todavia o crescimento dos países em desenvolvimento contraria esta tendência positiva (Gillespie, 2012).

As principais fontes de emissões das centrais betuminosas são os secadores de agregados, queimadores e os misturadores, os quais emitem grandes quantidades de material particulado e vários gases poluentes. Outras fontes que não devem ser menosprezadas são os silos de armazenamento do betume e das misturas, os aquecedores de óleo usados para elevar a temperatura dos tanques de armazenamento e as operações de carga e descarga, onde se incluem os gases que escapam do interior do leito dos camiões de transporte (OAQPS, 2000). Existem ainda outras formas de poluição, como o ruído dos equipamentos e máquinas, os odores libertados e a possibilidade de certos contaminantes atingirem os lençóis freáticos próximos do local da central.

## 5.1. Estudo de Viabilidade Económica

### 5.1.1. Redução do Consumo Energético

#### A. Mistura Betuminosa de Alto Módulo

A produção de misturas betuminosas temperadas com introdução de aditivos requer uma análise de custo-benefício, de forma a verificar se a redução de custos com combustível, associada à redução de temperatura, compensa o custo relativo à aquisição do aditivo.

A MBAM temperada foi obtida através da introdução do aditivo químico Rediset™, o qual apenas atua sobre a mistura, logo as reduções de temperatura alcançadas refletem-se apenas no aquecimento dos agregados, que passa a necessitar de 114 °C em vez dos 160 °C (Tabela 3.1). A temperatura de aquecimento do betume mantém-se nos 170 °C para ambas as misturas.

Para o cálculo da redução do consumo energético final foram estabelecidos os parâmetros da Tabela 5.2 e aplicadas as equações 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5, com base na literatura (Motta, 2011; Perry e Green, 1997). Admitiu-se uma temperatura ambiente de 14,1 °C de acordo com a temperatura média anual do ar. Assumiu-se 3% como a percentagem de humidade no agregado à temperatura ambiente, dado que a partir dessa percentagem a produção passa a ter uma eficiência inferior a 100% (Zubaran, 2012).

$$E_{\text{aquecimento agregados}} = C_{agr} \times m_{agr} \times (t_{agr} - t_{amb})$$

Equação 5.1

$$E_{\text{aquecimento água}} = C_a \times \left( \frac{m_{agr}}{m_{agr} - \frac{\%h_{agr}}{100} \times m_{agr}} - 1 \right) \times m_{agr} \times (100 - t_{amb})$$

Equação 5.2

$$E_{\text{vaporização da água}} = C_{lv} \times \left( \frac{m_{agr}}{m_{agr} - \frac{\%h_{agr}}{100} \times m_{agr}} - 1 \right) \times m_{agr}$$

Equação 5.3

$$E_{\text{aquecimento vapor}} = C_v \times \left( \frac{m_{agr}}{m_{agr} \times \frac{\%h_{agr}}{100} \times m_{agr}} - 1 \right) \times m_{agr} \times (t_{agr} - 100)$$

Equação 5.4

$$E_{\text{aquecimento betume}} = C_b \times m_b \times (t_b - t_{amb})$$

Equação 5.5

Onde:

$C_{agr}$  – Calor específico dos agregados;

$m_{agr}$  – Massa dos agregados;

$t_{agr}$  – Temperatura de aquecimento dos agregados;

$t_{amb}$  – Temperatura ambiente;

$C_a$  – Calor específico da água;

$\%h_{agr}$  – Percentagem de humidade dos agregados;

$C_{lv}$  – Calor latente de vaporização da água;

$C_v$  – Calor específico do vapor de água.

$C_b$  – Calor específico do betume;

$m_b$  – Massa do betume;

$t_b$  – Temperatura de aquecimento do betume.

Tabela 5.2 – Parâmetros considerados para o cálculo da energia despendida na secagem e aquecimento dos agregados da MBAM.

Parâmetro	Valor	Unidade SI
Temperatura ambiente	287,3	°K
Temperatura dos agregados - MBQ	433,2	°K
Temperatura dos agregados - MBT	387,2	°K
Calor específico dos agregados	0,92	kJ/kg.°K
Calor específico da água	4,19	kJ/kg.°K
Calor específico do vapor	0,51	kJ/kg.°K
Calor latente ou de vaporização da água	2250,00	kJ/kg
Teor de humidade dos agregados	3,0	%
Temperatura do betume - MBQ	443,2	°K
Temperatura do betume - MBT	443,2	°K
Calor específico do betume	2,09	kJ/kg.°K

Através da redução de 46 °C na temperatura de aquecimento dos agregados verifica-se uma redução de 18,4% no consumo energético final, de acordo com a Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Energia despendida para produzir uma tonelada de MBAM.

Parâmetro	MBQ	MBT
	Energia Despendida (kJ)	
Aquecimento dos agregados	127314,5	87174,2
Aquecimento da água	10558,5	10558,5
Vaporização da água	65969,1	65969,1
Aquecimento do vapor	892,2	208,2
Aquecimento do betume	16970,8	16970,8
$\Sigma$	248587,0	207525,2
$\Delta$ Total	18,4%	

Variando a humidade contida nos agregados de 0 a 7% obtêm-se as reduções de consumo energético indicadas no Gráfico 5.1.

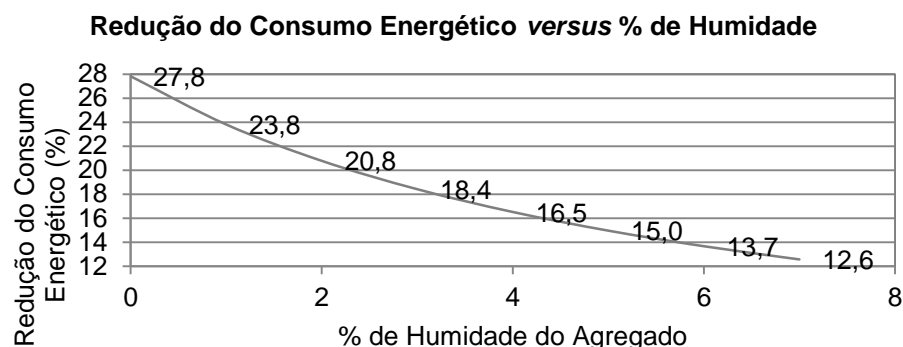


Gráfico 5.1 – Redução do consumo energético na secagem e aquecimento dos agregados de acordo com a sua percentagem de humidade à temperatura ambiente.

#### B. Betão Betuminoso Rugoso

O betão betuminoso rugoso (BBr) foi produzido através da introdução do aditivo orgânico Sasobit®, o qual atua sobre a reologia do betume, portanto as reduções de temperatura obtidas refletem-se tanto sobre o aquecimento dos agregados, como do betume, que passam a necessitar de 150 °C em vez de 170 °C.

Para determinar a redução de consumo energético associada ao aquecimento dos agregados, foram considerados os mesmos parâmetros da Tabela 5.2, exceto as temperaturas. Embora a natureza dos agregados se altere, o calor específico que os caracteriza é semelhante, tendo sido assumido o mesmo valor.

Relativamente ao betume, importa referir que este poderá ser entregue na central à temperatura de fabrico da mistura que se pretende produzir. Nesta situação, praticamente não existe poupança energética inerente ao aquecimento deste componente, embora ocorram sempre perdas de calor no transporte e seja sempre necessário introduzir algum aquecimento. Existem outras situações onde o betume é arrefecido até à temperatura ambiente, quando existe a necessidade deste permanecer muito tempo armazenado na central e se pretende evitar o seu envelhecimento e oxidação. Numa avaliação deste género importa saber qual o consumo energético total, portanto assumiu-se o aquecimento do betume da temperatura ambiente até à temperatura de fabrico. Admitiu-se igualmente o calor específico indicado na Tabela 5.2.

Através da redução de 20 °C na temperatura de aquecimento dos componentes é possível uma redução de consumo energético de 8,6% (Tabela 5.4), admitindo uma vez mais 3% de humidade nos agregados à temperatura ambiente.



Tabela 5.4 – Energia despendida para produzir uma tonelada de BBr.

Parâmetro	MBQ	MBT
	Energia Despendida (kJ)	
Aquecimento dos agregados	136901,7	119338,9
Aquecimento da água	10625,4	10625,4
Vaporização da água	66386,6	66386,6
Aquecimento do vapor	1047,5	748,2
Aquecimento do betume	15012,6	13086,7
$\Sigma$	229973,8	210185,8
$\Delta$ Total	8,6%	

Uma vez mais, variando a humidade de 0 a 7% obtêm-se as reduções de consumo energético indicadas no Gráfico 5.2.

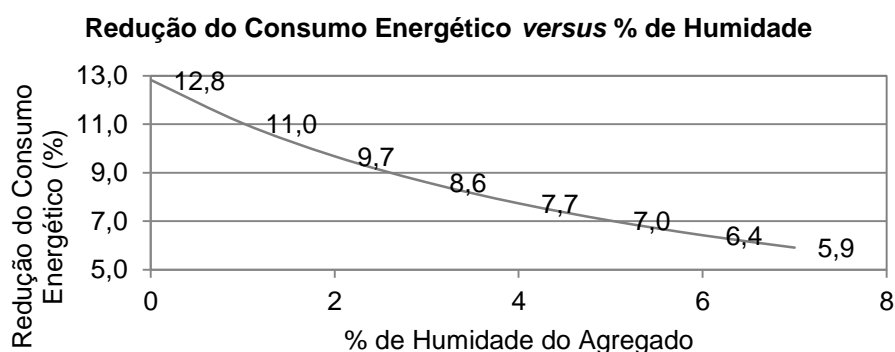


Gráfico 5.2 – Redução do consumo energético na secagem e aquecimento dos agregados de acordo com a sua percentagem de humidade à temperatura ambiente.

### 5.1.2. Estimativa da Poupança

Embora a produção de misturas betuminosas temperadas, através da introdução de aditivos diretamente no aditivo, não impliquem custos extraordinários com alterações a introduzir nas centrais, existe sempre o custo associado à aquisição desses produtos.

Numa primeira aproximação à redução dos custos, optou-se por determinar quais as quantidades de diferentes combustíveis necessárias através do valor de poder calorífico inferior (LHV) de cada um (Tabela 5.5), desprezando todas as condicionantes inerentes à produção em central.

Tabela 5.5 – Poder calorífico inferior (LHV) de vários tipos de energia/combustível (May *et al.*, 1999; Boundy *et al.*, 2011).

Combustível	LHV	Unidade
Gasóleo Rodoviário	42791	kJ/kg
Gasóleo de aquecimento	42612	kJ/kg
Fuelóleo (Nº1/2)	42686	kJ/kg
Gás natural	47141	kJ/kg
Propano	46296	kJ/kg
Energia Elétrica <sup>d)</sup>	3600	kJ/kWh

<sup>d)</sup> Poder calorífico inferior e superior não se aplica à energia elétrica

Foram avaliadas as poupanças conseguidas ao produzir uma tonelada de mistura usando como combustível gasóleo rodoviário, gasóleo de aquecimento, fuelóleo, gás natural, propano e eletricidade, cujos preços foram obtidos a partir das estimativas da Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG, 2012) e de outras fontes.

#### A. Mistura Betuminosa de Alto Módulo

Na Tabela 5.6 encontram-se os preços de cada tipo de energia (referentes ao ano 2012), as quantidades necessárias e o respetivo preço final.

Tabela 5.6 – Quantidade e respetivo preço do combustível necessário para produzir uma tonelada de MBAM a quente e com redução das temperaturas de fabrico.

Combustível	Preço	Unidade	MBQ		MBQ	
			Quantidade	Preço final (€)	Quantidade	Preço final (€)
Gasóleo Rodoviário	1,73	€/kg	5,18	8,98	4,23	7,33
Gasóleo de Aquecimento	1,54	€/kg	5,20	8,04	4,24	6,56
Fuelóleo	0,86	€/kg	5,19	4,44	4,24	3,63
Gás Natural	0,52	€/kg	4,70	2,45	3,84	2,00
Propano	0,93	€/kg	4,79	4,46	3,91	3,64
Energia Elétrica	0,14	€/kwh	61,59	8,56	50,25	6,98

Tendo em conta que para produzir de forma temperada uma tonelada de MBAM são necessários 0,52 kg de aditivo, foi avaliado o preço máximo por quilo que este poderá custar, para que a sua utilização seja compensatória (Tabela 5.7).

Tabela 5.7 – Custo máximo do aditivo usado no caso de estudo da MBAM.

Combustível	$\Delta$ €	Custo máximo do aditivo Rediset™
		€/kg
Gasóleo Rodoviário	1,65	3,18
Gasóleo de Aquecimento	1,48	2,85
Fuelóleo	0,82	1,57
Gás Natural	0,45	0,87
Propano	0,82	1,58
Energia Elétrica	1,58	3,03

### B. Betão Betuminoso Rugoso

A Tabela 5.8 apresenta os preços dos vários tipos de energia, as quantidades necessárias para perfazer o consumo energético indicado na Tabela 5.4 e o respetivo custo final.

Tabela 5.8 – Quantidade e respetivo preço do combustível necessário para produzir uma tonelada de BBr a quente e com redução das temperaturas de fabrico.

Combustível	Preço	Unidade	MBQ		MBQ	
			Quantidade	Preço final (€)	Quantidade	Preço final (€)
Gasóleo Rodoviário	1,73	€/kg	5,37	9,31	4,91	8,51
Gasóleo de Aquecimento	1,54	€/kg	5,40	8,34	4,93	7,62
Fuelóleo	0,86	€/kg	5,39	4,61	4,92	4,21
Gás Natural	0,52	€/kg	4,88	2,54	4,46	2,33
Propano	0,93	€/kg	4,97	4,63	4,54	4,23
Energia Elétrica	0,14	€/kwh	63,89	8,88	58,39	8,12

Para produzir uma tonelada de betão betuminoso rugoso são necessários 1,84 kg de aditivo, tendo sido avaliado qual o preço máximo que este poderá custar por quilo, de modo a representar vantagem económica (Tabela 5.9).

Tabela 5.9 – Custo máximo do aditivo usado no caso de estudo do BBr.

Combustível	$\Delta$ €	Custo máximo do aditivo Sasobit®
		€/kg
Gasóleo Rodoviário	0,80	0,44
Gasóleo de Aquecimento	0,72	0,39
Fuelóleo	0,40	0,22
Gás Natural	0,22	0,12
Propano	0,40	0,22
Energia Elétrica	0,76	0,42

### 5.1.3. Análise dos Resultados

Para ambas as misturas em estudo foi determinado o consumo energético total despendido no aquecimento dos componentes, com vista a determinar a potencial redução, inerente ao fabrico destas, com temperaturas inferiores às convencionais. Posteriormente foram calculadas, para diferentes tipos de combustíveis, as quantidades necessárias para alcançar os referidos consumos energéticos e os respetivos custos.

Do Gráfico 5.3 é possível constatar que o gasóleo rodoviário, o gasóleo de aquecimento e a energia elétrica são mais dispendiosos, sendo também para esses que se obtêm os valores mais elevados para o custo máximo que o aditivo Rediset™ poderá atingir, representando vantagem económica para o produtor. O gás natural, por ser um combustível bastante mais económico que os restantes, implica também um preço máximo do aditivo bastante inferior, porém a sua aplicação nesta indústria tem vantagens indiscutíveis, nomeadamente a possibilidade de consumo interno, em virtude de estar disponível no local, substituindo a utilização de outros combustíveis.

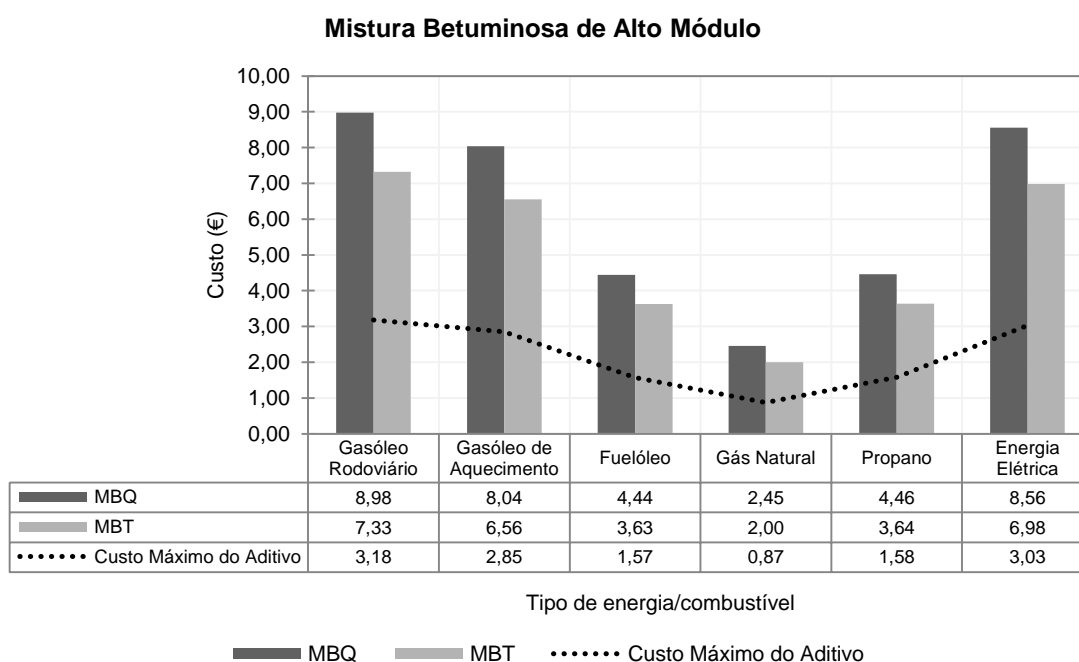


Gráfico 5.3 – Análise do custo de diferentes tipos de combustível usados para produzir uma tonelada de MBAM de forma convencional e temperada.

Relativamente ao betão betuminoso rugoso, a partir do Gráfico 5.4, é possível afirmar que, pela mesma ordem de ideias, fuelóleo, propano e gás natural são os tipos de energia mais económicos para o fabrico de uma tonelada de mistura. Todavia, neste caso, a redução energética final obtida não permite uma margem muito elevada entre o custo para a mistura convencional e a mistura temperada, o que conduz a valores

reduzidos para o preço máximo que o aditivo Sasobit® poderá custar, de modo a representar benefício em termos económicos.

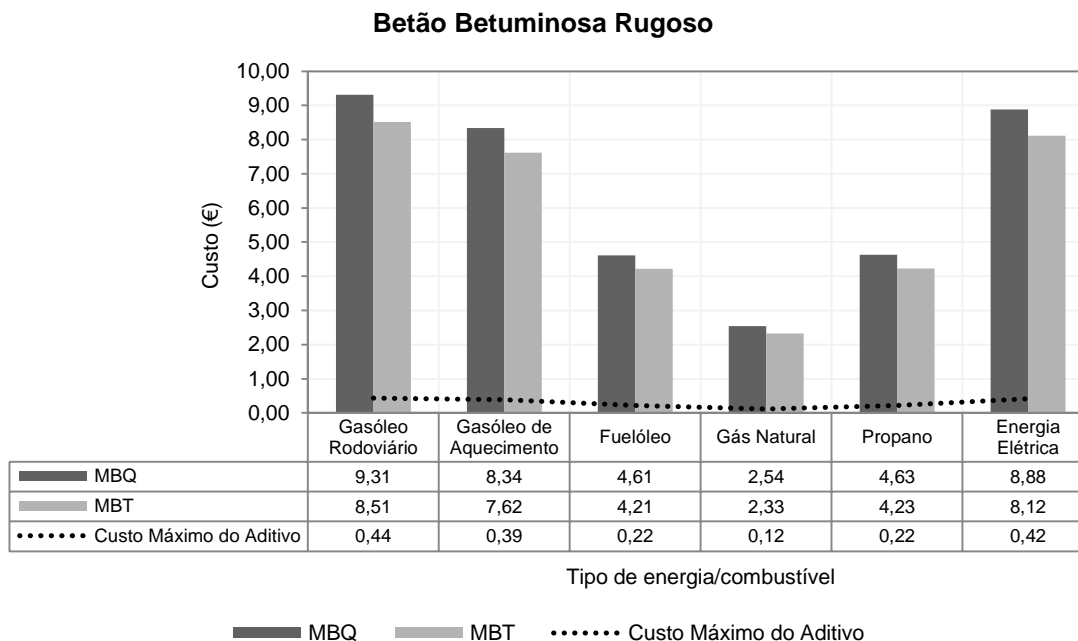


Gráfico 5.4 – Análise do custo de diferentes tipos de combustível usados para produzir uma tonelada de MBAM de forma convencional e temperada.

Importa salientar que a quantidade de energia gasta numa central depende de vários fatores, não se prendendo apenas com valor de cálculo, obtido através do consumo energético total, e do poder calorífico de cada combustível. A tipologia de central, os sistemas de aquecimento, os queimadores, a produção média anual estabelecida, a origem da energia elétrica, o tipo de material a ser produzido, o isolamento das tubagens e o seu comprimento, o clima do local onde a central se encontra, entre muitos outros parâmetros, condicionam a quantidade de combustível que na realidade é gasta.

Embora tenha sido feita uma análise individual para cada tipo de energia/combustível, na realidade as centrais usam vários tipos de energia em simultâneo e existem sempre as condicionantes acima referidas. A título de exemplo, uma central de pequenas dimensões, com uma produção média anual de 50 mil toneladas, consome em média 10 litros de combustível, incluindo fuelóleo, gasóleo de aquecimento e gasóleo rodoviário, com um desvio padrão de 3 litros, para produzir uma tonelada de mistura betuminosa convencional.

Todos os cálculos foram realizados assumindo uma transferência de calor 100% eficaz, o que é extremamente conservativo. Na realidade seriam gastas maiores quantidades

de combustível e, por conseguinte, haveria também um incremento no preço máximo dos aditivos em análise.

## 5.2. Estudo de Impacte Ambiental

Esta análise será um indicativo da vantagem ambiental e social que a produção de misturas betuminosas temperadas poderá significar, todavia carece de uma parte fundamental que consiste em analisar laboratorialmente as quantidades de dióxido de carbono que são emitidas diretamente das misturas betuminosas. Segundo Keches e LeBlanc (2007), percentualmente, a redução de emissões relativas às necessidades energéticas de fabrico das misturas corresponde a cerca de 36%, enquanto a redução relativa aos próprios materiais corresponde a 64%.

O Departamento britânico para a Energia e Mudanças Climáticas (DECC) indica fatores de conversão para medir as emissões que diferentes tipos de combustível poderão causar (DECC, 2010). Para a avaliação da redução das emissões de CO<sub>2</sub> foram usados os fatores indicados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Fatores de conversão de diferentes tipos de combustível para emissões de CO<sub>2</sub> (DECC, 2010).

Conversão de Diferentes tipos de Combustível para CO <sub>2</sub>	Unidade de Medição	Fator de Emissão kgCO <sub>2</sub> /Unidade de Medição
Gasóleo	L	2,639
Fuelóleo	ton	3216
Gás Natural	kWh	0,1836
Energia Elétrica	kWh	0,541

A Tabela 5.11 apresenta as potenciais quantidades de CO<sub>2</sub> emitidas ao produzir uma tonelada de MBAM e, a título de exemplo, as quantidades emitidas ao produzir 5,5 milhões de toneladas, correspondente ao mínimo anual produzido em Portugal (Sivilevicius e Sukevicius, 2009). A variação entre as quantidades emitidas pela MBQ e a temperada corresponde aos mencionados 18,4% (5.1.1-A).

Tabela 5.11 – Emissões de CO<sub>2</sub> para o caso de estudo da MBAM.

Tipo de Mistura		MBAM			
Tipo de Fabrico		MBQ		MBT	
Quantidade produzida (ton)		1	5,50E+06	1	5,50E+06
Consumo Energético Total (kJ)		2,22E+05	1,22E+12	1,81E+05	9,95E+11
kgCO <sub>2</sub> emitido	1.Gasóleo	1,63E+01	8,95E+07	1,33E+01	7,30E+07
	2.Fuelóleo	1,67E+01	9,19E+07	1,36E+01	7,50E+07
	3.Gás Natural	1,17E+01	6,44E+07	9,55E+00	5,25E+07
	4.Eletricidade	3,33E+01	1,83E+08	2,72E+01	1,50E+08

Verifica-se através do Gráfico 5.5 que o gás natural é o combustível que menores emissões de CO<sub>2</sub> provoca. A quantidade de energia elétrica necessária para produzir misturas betuminosas é bastante elevada, comparativamente aos restantes combustíveis, devido ao poder calorífico, que se assume igual à carga resistiva, ser baixo. Este fator traduz-se em elevadas emissões.

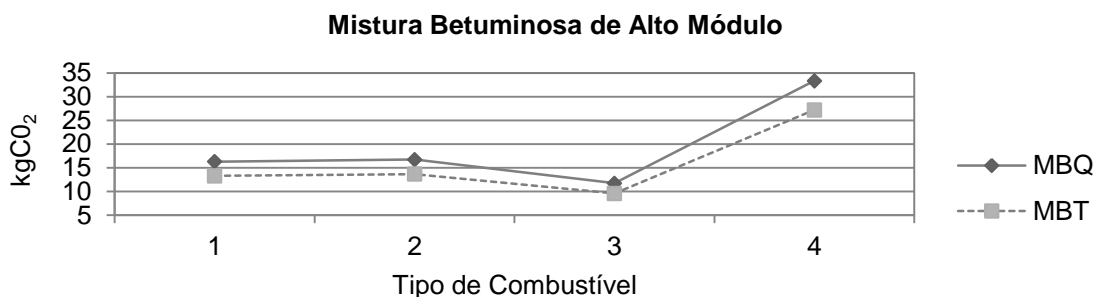


Gráfico 5.5 – Quantidades de CO<sub>2</sub> emitidas na produção da MBAM de forma convencional e temperada, recorrendo a diferentes tipos de combustível.

Da Tabela 5.12 e do Gráfico 5.6 retiram-se as mesmas relações que anteriormente, sendo a redução de emissões inferior, correspondente aos 8,6% atrás mencionados (5.1.1-B).

Tabela 5.12 – Emissões de CO<sub>2</sub> para o caso de estudo do BBr.

Tipo de Mistura		MBAM			
Tipo de Fabrico		MBQ		MBT	
Quantidade produzida (ton)		1	5,50E+06	1	5,50E+06
Consumo Energético Total (kJ)		2,30E+05	1,26E+12	2,10E+05	1,16E+12
kgCO <sub>2</sub> emitido	1. Gasóleo	1,69E+01	9,29E+07	1,54E+01	8,49E+07
	2. Fuelóleo	1,73E+01	9,53E+07	1,58E+01	8,71E+07
	3. Gás Natural	1,21E+01	6,68E+07	1,11E+01	6,10E+07
	4. Eletricidade	3,46E+01	1,90E+08	3,16E+01	1,74E+08

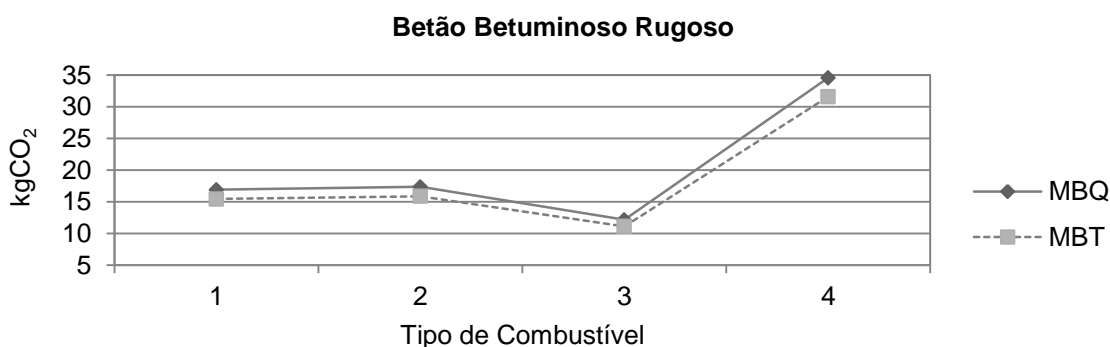


Gráfico 5.6 – Quantidades de CO<sub>2</sub> emitidas na produção do BBr de forma convencional e temperada, recorrendo a diferentes tipos de combustível.





CAPÍTULO 6  
CONCLUSÕES

---



## **6. CONCLUSÕES**

### **6.1. Considerações Finais**

Atualmente, o respeito pelo meio ambiente tem-se tornado uma preocupação cada vez mais presente, quer individual, quer ao nível das indústrias. Os responsáveis pelas centrais de fabrico de misturas betuminosas estão mais conscientes, nomeadamente, através da adoção de combustíveis mais sustentáveis, como o gás natural, porém continuam a contribuir com uma fatia considerável para os gases emitidos que provocam efeito de estufa.

A implementação das misturas betuminosas temperadas nas centrais surgiu como uma das soluções mais promissoras, todavia o septicíssimo dos produtores quanto à qualidade e ao desempenho final destas misturas, bem como os possíveis acréscimos de custos, têm travado o seu estabelecimento definitivo.

O desempenho final da MBAM temperada não mostrou diferenças significativas face à mistura padrão, fabricada às temperaturas convencionais. A mistura BBr temperada, até onde foi possível avaliar o seu comportamento, também não manifestou uma performance díspar da mistura convencional. Face à resistência à deformação permanente, comprovou-se até que a adição do aditivo orgânico em estudo promove características ótimas.

O estudo de viabilidade económica demonstrou que o fabrico da MBAM temperada tem bastante margem em termos de consumo energético, possibilitando um preço máximo para o aditivo, que representa vantagem económica, bastante razoável. O mesmo não acontece para o aditivo estudado no betão betuminoso rugoso, todavia as vantagens que a sua introdução poderá significar em termos de desempenho final e de redução das emissões de carbono deverão ser devidamente ponderadas. A avaliação do impacte ambiental, através da análise da redução das emissões de CO<sub>2</sub> apenas relativas ao consumo energético do fabrico das misturas em central, perspectiva enormes reduções. Os estudos feitos demonstraram que as MBT ostentam um comportamento semelhante, e que o seu custo de produção não será muito superior ao das misturas convencionais, tal como a literatura indica.

Produzir misturas betuminosas temperadas, em conjunto com outras medidas, como armazenar os agregados cobertos e em superfície inclinada, um controlo mais rígido da alimentação da combustão dos queimadores, possibilitando menores perdas de calor, o armazenamento mais eficaz das misturas betuminosas e a conversão total dos combustíveis fósseis para gás natural, possibilitarão reduções consideráveis dos

consumos energéticos e das emissões de CO<sub>2</sub>, gases nocivos e poeiras, fatores que se traduzirão em vantagens económicas, ambientais e sociais.

Em suma, este foi mais um pequeno contributo para a longa investigação que tem vindo a ser feita nesta área, havendo muito mais a desenvolver.

## **6.2. Desenvolvimentos Futuros**

Este tipo de investigação deixa sempre em aberto novas possibilidades. A avaliação de aditivos como meio de redução das temperaturas de fabrico e compactação poderá ser feita com diferentes materiais (agregados e ligantes) dentro do mesmo tipo de misturas, ou para diferentes tipos de misturas.

A MBAM poderá ser estudada com um filer comercial, com menos impurezas, o que poderá significar a melhoria do seu desempenho. Relativamente à mistura BBr temperada existe a necessidade clara de ser avaliado o seu comportamento em termos de resistência ao fendilhamento por fadiga, podendo assim ser feita uma análise comparativa completa do seu desempenho. Este tipo de solução para camada de desgaste é de extrema importância porque, embora esta camada não contribua significativamente para a resistência estrutural do pavimento, é a que assegura o conforto e a segurança de circulação dos utentes. Especificamente, este tipo de mistura promove a redução do ruído rodoviário provocado pelo atrito pneu-pavimento, com aplicação em autoestradas ou vias com tráfego elevado, onde o conforto de circulação é imprescindível.

Relativamente à avaliação das misturas betuminosas temperadas, seria interessante o desenvolvimento de trechos experimentais, dada a existência de muitas condicionantes de obra, que laboratorialmente não são consideradas. Seria também fundamental avaliar o comportamento destas misturas a longo prazo, ou seja, simular o envelhecimento destas, de forma a avaliar qual seria o comportamento real, de um pavimento que as incorporasse, após alguns anos aberto ao tráfego automóvel.

A característica avaliada que, pelo menos aparentemente, mais carece de uma investigação mais profunda é a sensibilidade à ação da humidade, tendo sido aquela que apresentou resultados mais aquém do desejável. Desenvolvimentos futuros passariam por determinar as potenciais causas para a redução da resistência à ação da água da mistura temperada, face à mistura padrão e, por conseguinte, encontrar possíveis soluções, que poderão passar por alterações em termos do fabrico e compactação da mistura, dos parâmetros e especificações do ensaio e, em última instância, pelo aperfeiçoamento do aditivo. Esta característica é atualmente determinada de acordo com uma norma europeia, para a qual não existem limites indicativos da

qualidade dos materiais, nem conversão dos resultados para os obtidos com antiga standardização usada. Torna-se indispensável estabelecer estes dois parâmetros para que os resultados atuais sejam corretamente interpretados e seja possível a sua correlação com os resultados obtidos com anterior normalização.

Relativamente à avaliação da viabilidade económica, importa salientar, uma vez mais, que foi considerada uma eficiência de transferência de calor de 100% e que a análise foi feita individualmente para cada tipo de combustível/energia. Assim, seria interessante ser feito o estudo, assumindo desta vez valores reais para a eficiência de transferência de calor, e, de modo a obter resultados mais palpáveis, ser feita a análise de um caso de estudo, onde todos os parâmetros estivessem estabelecidos.

Tal como referido no subcapítulo 5.2, a conclusão do estudo do impacte ambiental requer a determinação da redução de emissões de CO<sub>2</sub> diretamente da mistura betuminosa. Deveria ser avaliada também a redução dos restantes gases nocivos e poeiras, de modo a ser determinado o nível de melhoria da segurança e da qualidade de trabalho dos operadores das centrais.



## BIBLIOGRAFIA

---





## BIBLIOGRAFIA

- AASHTO, Asphalt Institute, FHWA, NAPA e NSSGA, 2007. *National Asphalt Roadmap - A Commitment to the Future*, Disponível em:  
[https://www.asphaltpavement.org/PDFs/roadmap/National\\_Aspphalt\\_Roadmap\\_June\\_18\\_2007\\_full.pdf](https://www.asphaltpavement.org/PDFs/roadmap/National_Aspphalt_Roadmap_June_18_2007_full.pdf).
- AASHTO, 2007. Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage - AASHTO T 283-03.
- Almeida, A. e Logaraj, S., 2010. Surface-Active Bitumen Additive for Warm Mix Asphalt with Adhesion Promoting Properties AkzoNobel, ed. Disponível em:  
[http://www.akzonobel.com/surface/system/images/AkzoNobel\\_paper\\_Surface\\_active\\_bitumen\\_additive\\_warm\\_mix\\_tcm45-34711.pdf](http://www.akzonobel.com/surface/system/images/AkzoNobel_paper_Surface_active_bitumen_additive_warm_mix_tcm45-34711.pdf).
- Alshamsi, K.S., 2006. *Development of a Mix Design Methodology for Asphalt Mixtures with Analytically Formulated Aggregate Structures*. Universidade Estadual de Luisiana.
- Alves, M.C.C.S.L., 2012. *Estudo do Desempenho de Materiais Alternativos na Pavimentação Rodoviária - O caso das Misturas Betuminosas Temperadas*. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico
- Alves, T.S.F., 2007. *Metodologias de Auscultação de Pavimentos Rodoviários*. Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico
- Bardini, V.S.S., Klinsky, L.M.G. & Fernandes, J.L., 2009. A Importância do Fíler para o Bom Desempenho de Misturas Asfálticas. *Minerva*, 7(1): 71 a 78.
- Barrão, L.C.S.P.C., 2011. *Avaliação do Comportamento de Misturas Betuminosas sob Temperaturas Elevadas*. Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa. Disponível em:  
[http://run.unl.pt/bitstream/10362/6897/1/Barrao\\_2011.pdf](http://run.unl.pt/bitstream/10362/6897/1/Barrao_2011.pdf).
- Boundy, B., Diegel, S. W., Wright, L. e Davis, S. C., 2011. *Biomass Energy Data Book - Appendix A* 4th ed.,
- Capitão, S.D., 1996. *Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade*. Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra.

- Capitão, S.D., 2010. Pavimentos Rodoviários com Misturas Betuminosas de Alto Módulo (MBAM). Disponível em: <http://www.engenhariacivil.com/pavimentos-rodoviaros-misturas-betuminosas-alto-modulo-mbam>.
- Capitão, S.D., Picado-Santos, L. & Pais, J., 2004. Deformabilidade, comportamento à fadiga e resistência à deformação permanente de misturas betuminosas de alto módulo para camadas de base. In *III Congresso Rodoviário Português*. Lisboa.
- Carpenter, S.H. e Ghuzlan, K.A., 2000. Energy-Derived, Damage-Based Failure Criterion for Fatigue Testing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*.
- CEN, 2007a. Bitumen and Bituminous Binders - Determination of kinematic viscosity - EN 12595.
- CEN, 2007b. Bitumen and Bituminous Binders - Determination of needle penetration - EN 1426. *Determination of needle penetration*, EN 1426.
- CEN, 2003a. Bitumen and Bituminous Binders - Determination of the elastic recovery of modified bitumen - EN 13398.
- CEN, 2007c. Bitumen and Bituminous Binders - Determination of the resistance to hardening under the influence of heat and air - Part1: RTFOT method - EN 12607-1.
- CEN, 2007d. Bitumen and Bituminous Binders - Determination of the softening point - Ring and Ball method - EN 1427.
- CEN, 2003b. Bitumen and Bituminous Binders - Estorage Estability - EN 13399.
- CEN, 2003c. Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel tracking - EN 12697-22.
- CEN, 2004a. Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 24: Resistance to fatigue - EN 12697-24.
- CEN, 2002. Bituminous Mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density - EN 12697-5. *Part 5: Determination of the maximum density*, EN 12697-5.

- CEN, 2003d. Bituminous Mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens - EN 12697-12.
- CEN, 2003e. Bituminous Mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens - EN 12697-23.
- CEN, 2004b. Bituminous Mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part26: Stiffness - EN 12697-26.
- Clariant, 2007. Licomont® BS 100 for Bitumen Modification in Road Construction. Disponível em:  
[http://www.exolit.com/C125720D002B963C/A53076CE62AC2460C125728100599F99/\\$FILE/DA8228E\\_1107\\_BR\\_RoadConstruction.pdf](http://www.exolit.com/C125720D002B963C/A53076CE62AC2460C125728100599F99/$FILE/DA8228E_1107_BR_RoadConstruction.pdf).
- Coni, M., Portas, S., Isola, R. e Oliveira, J. R. M., 2008. FE Evaluation of 4-Point Bending Test for Fatigue Cracking Assessment. In Taylor e Francis Group, ed. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/18704>.
- Cordeiro, T.A.M., 2012. *Misturas Betuminosas Temperadas de Alto Módulo de Deformabilidade*. Dissertação de mestrado, Universidade de Aveiro.
- D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowser, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B. D., Sines, R. e Yeaton, B., 2008. *Warm-Mix Asphalt: European Practice*, Federal Highway Administration. Disponível em:  
<http://international.fhwa.dot.gov/pubs/pl08007/pl08007.pdf>.
- DECC, 2010. CRC Energy Efficiency Scheme Order: Table of Conversion Factors. , (January). Disponível em:  
[http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20121217150421/http://www.decc.gov.uk/publications/basket.aspx?FilePath=What+we+do%5cA+low+carbon+UK%5ccrc%5c1\\_20100122101538\\_e\\_%40%40\\_crcconversiontable.pdf&filetype=4](http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20121217150421/http://www.decc.gov.uk/publications/basket.aspx?FilePath=What+we+do%5cA+low+carbon+UK%5ccrc%5c1_20100122101538_e_%40%40_crcconversiontable.pdf&filetype=4).
- Devivere, M. V, Barthel, W. e Marchand, J.P., 2003. *Warm Asphalt Mixes by Adding Aspha-Min a Synthetic Zeolite*, World Road Association. Disponível em:  
<http://www.aspha-min.com/Downloads.html>.

Devivere, M. V., Barthel, W. e Marchand, J.P., 2004. Warm Asphalt Mixes by Adding Aspha-Min a Synthetic Zeolite.

Dewey, G., 2011. Warming up to WMA - Applications by Northern States, Michigan Department of Transportation

DGEG, 2012. Estatísticas Rápidas - Junho de 2012, Nº86.

Duarte, R.M.B., 2010. *Aplicação das Normas Europeias nas Misturas Betuminosas*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10216/59606>.

EAPA, 2007. Environmental Guidelines on Best Available Techniques ( BAT ) for the Production of Asphalt Paving Mixes. Bruxelas

EAPA, 2010. *The use of Warm Mix Asphalt*, Bruxelas: European Asphalt Pavement Association. Disponível em: [http://www.eapa.org/usr\\_img/position\\_paper/the\\_use\\_of\\_warm\\_mix\\_asphalt\\_january\\_2010.pdf](http://www.eapa.org/usr_img/position_paper/the_use_of_warm_mix_asphalt_january_2010.pdf)

Ecobit, 2011. The Green Alternative to Black Pavement. Disponível em: <http://www.ecobit.com/dot.html>.

EP, 2009. Caderno de Encargos Tipo Obra - 14.03 - Pavimentação - Características dos Materiais.

Ferreira, C.I.G., 2009. *Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas*. Dissertação de mestrado, Universidade do Minho. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/10536>

FHWA, 1982. Inspectors Training Course Manual Final Version. *Principles of Construction of Quality Hot Mix Asphalt Pavements*. Disponível em: <http://isddc.dot.gov/OLPFiles/FHWA/014724.pdf>.

Gillespie, I., 2012. *Quantifying the energy used in an asphalt coating plant*. Dissertação de mestrado, Universidade de Engenharia de Strathclyde.

- Goh, S.W., You, Z. e Vam-Dam, T.J., 2007. Laboratory evaluation and pavement design for warm mix asphalt. In *Mid-Continent Transportation Research Symposium*. Ames, Iowa. Disponível em:  
[http://www.intrans.iastate.edu/publications/\\_documents/midcon-presentations/2007/YouLaboratory.pdf](http://www.intrans.iastate.edu/publications/_documents/midcon-presentations/2007/YouLaboratory.pdf).
- González, J., 2010. Warm Mix Asphalts by Chemical Additives - Properties and Advantages. *16th World Meeting - Sharing the road*. Disponível em:  
<http://www.crp.pt/docs/A28S53-90.pdf>.
- Greenpeace, 2000. O Protocolo de Kyoto. 6, pp.6–7. Disponível em:  
[http://www.acervodigital.unesp.br/bitstream/123456789/66267/7/7\\_protocolo\\_kyoto.pdf](http://www.acervodigital.unesp.br/bitstream/123456789/66267/7/7_protocolo_kyoto.pdf)
- Hurley, G.C. e Prowell, B.D., 2005a. *Evaluation of Aspha-Min Zeolite for use in Warm Mix Asphalt*, National Center for Asphalt Technology. Disponível em:  
<http://www.eng.auburn.edu/files/centers/ncat/reports/2005/rep05-04.pdf>.
- Hurley, G.C. e Prowell, B.D., 2006. Evaluation of Potential Processes for Use in Warm Mix Asphalt. *Journal Association of Asphalt Paving Technologies*, 75. Disponível em:  
[http://www.warmmixasphalt.com/submissions/10\\_20071127\\_Evaluation\\_of\\_Potential\\_Processes.pdf](http://www.warmmixasphalt.com/submissions/10_20071127_Evaluation_of_Potential_Processes.pdf).
- Hurley, G.C. e Prowell, B.D., 2005b. *Evaluation of Sasobit for Use in Warm Mix Asphalt*, Auburn.
- Jenkins, K.J. et al., 1999. Half-warm foamed bitumen treatment, a new process. In *VII Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa*. pp. 1–17.
- Jones, D., Tsai, B.W. e Signore, J., 2010. *Warm-Mix Asphalt Study: Laboratory Test Results for AkzoNobel Rediset™ WMX*, AkzoNobel Surface Chemistry LLC. Disponível em: <http://www.dot.ca.gov/research/researchreports/reports/2010/ucprc-cr-2010-01.pdf>.
- Keches, C. e LeBlanc, A., 2007. *Reducing Greenhouse Gas Emissions from Asphalt Materials*. Dissertação de bacharelato, Instituto Politécnico de Worcester. Disponível em: [http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-022807-143808/unrestricted/Keches\\_LeBlanc\\_MQP\\_2007.pdf](http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-022807-143808/unrestricted/Keches_LeBlanc_MQP_2007.pdf)

- Koenders, B.G. et al., 2000. Innovative processes in asphalt production and application to obtain lower temperatures. In *Second Eurasphalt & Eurobitumen Congress*. Barcelona.
- Kristjansdottir, O., 2006. *Warm mix asphalt for cold weather paving*. Dissertação de mestrado, Universidade de Washington.
- Lopes, O.M.M., 2009. *Misturas Betuminosas - Determinação das Características para o Cálculo dos Pavimentos*. Dissertação de mestrado, Universidade do Porto. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10216/57510>.
- Lottman, R.P., 1978. *Predicting Moisture-Induced Damage to Asphaltic Concrete - Field Evaluation Phase*, Moscow, Idaho.
- Maccarrone, S., Holleran, G. e Ky, A., 1999. Cold asphalt systems as an alternative to hot mix. In *AAPA International Asphalt Conference*.
- May, J., Wilkey, T., Swanson, M., Daub, J., Farrow, G., Clayton, J., Clum, D., Moon, M., Eley, B. e Eley, F., 1999. Heating and Storing Asphalt at HMA Plants. Heatec, Inc, Chattanooga.
- MCConnaughay, 2012. The Low Energy Process. Disponível em: [http://www.mcconnaughay.com/lowemissionasphalt\\_process.php](http://www.mcconnaughay.com/lowemissionasphalt_process.php).
- Mendes, S.F., 2011. *Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas a Aplicar em Infraestruturas de Transporte*. Dissertação de mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.21/1248>.
- Motta, R. S., 2011. *Estudo de Misturas Asfálticas Mornas em Revestimentos de Pavimentos para Redução de Emissão de Poluentes e de Consumo Energético*. Dissertação de doutoramento, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- MQP, 2011. MQP's vision for a Low Carbon future using LEA® process technology M. Q. Products, ed. Disponível em: <http://www.mqp.co.uk/downloads/LEA-Sales-Support-BR.pdf>.
- Muthen, K.M., 1998. *Foamed asphalt mixes - Mix design procedure*, CR – 98/007. Sabita Ltd & CSIR Transportek. Disponível em: <http://www.greenmixinc.com/pics/foamasph.pdf>

- NAPA, 2008. Warm-Mix Asphalt: The future of Asphalt. Disponível em:  
<http://advasphalt.biz/images/WarmMixAsphalt.pdf>.
- OAQPS, 2000. *Hot Mix Asphalt Plants - Emission Assessment Report*, 454/R-00-019. U.S. Environment Protection Agency. Disponível em:  
<http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch11/related/ea-report.pdf>
- Pais, J. e Fonseca, P., 2004. Influência do tipo de agregado e ligante no comportamento das misturas betuminosas. *3º Congresso Rodoviário Português*. Disponível em:  
<http://hdl.handle.net/1822/14313>.
- Pais, J.C., Pereira, P. A. A., Minhoto, M. J. C., Fontes, L. P. T. L., Kumar, D. S. N. V. A. e Silva, B. T. A., 2009. Application of plateau value to predict fatigue life. In *Segundo Workshop on Four Point Bending*. pp. 59–68.
- Pais, J.C. e Palha, C.A.F., 2010. Resistência à Fadiga em Misturas Betuminosas para Pavimentos Rodoviários. In *8º Congresso Nacional de Mecânica Experimental*. Guimarães. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/16382>.
- Pais, J.C., Pereira, P.A.A. e Azevedo, M.C.M., 2000. Ensaio Mecânicos para Caracterização de Misturas Betuminosas. *1º Congresso Rodoviário Português - Estrada 2000*, pp.639–649.
- Pais, J.C., Picado-Santos, L. e Capitão, S.D., 2001. Estabelecimento de Misturas Betuminosas para Camadas Estruturalmente Importantes: da Formulação Analítica à Composição Final. In *Jornadas de Estradas e Pontes dos Países de Língua Portuguesa*. Lisboa. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/16568>.
- Palha, C.A.O.F., Silva, H.M.R.D. e Oliveira, J.R.M., 2009. Comparação de diferentes métodos de ensaio normalizados para avaliação do módulo de rigidez e da resistência à fadiga das misturas betuminosas. Disponível em:  
<http://hdl.handle.net/1822/18732>.
- Pereira, P. e Miranda, C., 1999. *Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*, Braga: Universidade do Minho.
- Pereira, R.X.L., 2010. *Misturas Betuminosas Temperadas : Estudo da Interação Aditivo-Ligante*. Dissertação de mestrado, Universidade de Aveiro. Disponível em:  
<http://hdl.handle.net/10773/3943>.

- Perry, R. H. e Green, D. W., 1997. Physical and Chemical Data. In R. H. Perry, D. W. Green, e J. O. Maloney, eds. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. McGraw-Hill.
- Picado-Santos, L., Branco, F. e Ferreira, P., 2008. *Pavimentos Rodoviários* 3ª ed. Edições Almedina, ed., Coimbra: Gráfica de Coimbra, Lda.
- Pinto, J.I.B.R., 2010. Caracterização de Pavimentos Rodoviários Betuminosos. Disponível em: <http://www.engenhariacivil.com/caracterizacao-pavimentos-rodoviaros-betuminosos>.
- Prowell, B.D. e Hurley, G.C., 2007. *Warm-Mix Asphalt: Best Practices, presentation*, National Asphalt Pavement Association. Disponível em: [http://www.warmmixasphalt.com/submissions/10\\_20071127\\_Evaluation\\_of\\_Potential\\_Processes.pdf](http://www.warmmixasphalt.com/submissions/10_20071127_Evaluation_of_Potential_Processes.pdf).
- Rao Tangella, S.C.S., Craus, J., Deacon, J. A. e Monismith, C. L., 1990. *Fatigue Response of Asphalt Mistures*, Berkeley. Universidade da Califórnia.
- Read, J., Whiteoak, D. e Hunter, R.N., 2003. *The Shell Bitumen Handbook* 5ª ed., Thomas Telford Publishing.
- Riley, T., 2004. Bitumen Occupational Health - Update on Recent Activities. In *8th Conference on Pavements for Southern Africa (CAPSA'04)*.
- Rowe, G.M., 1993. Performance of Asphalt Mixtures in the Trapezoidal Fatigue Test. In T. A. of A. P. Technologists, ed.
- Rowe, G.M. e Bouldin, M.G., 2000. Improved Techniques to Evaluate the Fatigue Resistance of Asphalt Mistures. In pp. 754–763.
- Rühl, R., Musanke, U., Kolmsee, K., Priess, R., Zoubek, G. e Breuer, D., 2006. Vapours and aerosols of bitumen: exposure data obtained by the German Bitumen Forum. *The Annals of occupational hygiene*, 50(5), pp.459–68. Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16501002>.
- Santos, A.F.R., 2011. *Temperaturas de Fabrico e Compactação de Misturas Betuminosas com Betumes Modificados*. Dissertação de mestrado, Universidade Nova de Lisboa. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/6007>.



- Sasol Wax GmbH, 2004. The Bitumen Additive for Highly Stable Easily Compactible Asphalts.
- Shen, S. e Carpenter, S.H., 2007. An energy approach for airport pavement low damage fatigue behavior. In *FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference*. Atlantic City.
- Silva, H.M.R.D. et al., 2010. Assessment of the Performance of Warm Mix Asphalts in Road Pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 3. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/18696>.
- Silva, H.M.R.D., 2006. *Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique - Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas*. Dissertação de doutoramento, Universidade do Minho. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/5981>.
- Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M. e Ferreira, C.I.G., 2009. Avaliação e desempenho de misturas betuminosas temperadas. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/18711>.
- Sivilevicius, H. e Sukevicius, S., 2009. Manufacturing technologies and dynamics of hot-mix asphalt mixture production. *Journal of Civil Engineering and Management*.
- Solaimanian, M. et al., 2003. Test Methods to Predict Moisture Sensitivity of Hot-Mix Asphalt Pavements (tópico 3). In *Moisture Sensivity of Asphalt Pavements: A National Seminar*. San Diego, Califórnia.
- Stotko, O., 2011. Energy and Related Carbon Emission Reduction Technologies for Hot Mix Asphalt Plants. In *10th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa - CAPSA*.
- Tatic, U., Ipavec, A., Kalman, B., Palkovic, B., Strineka, A., Marukic, I., Schollosser, F., Nemec, B., Srámek, J. e Mirski, K., 2006. *Practical mix design model for asphalt mixture*. European Commission DG Research.
- The German BITUMEN Forum, 2006. *Bitumen Forum* 1.600 ed. R. Rühl & B. Lindemeier, eds., Heinrich Lauk GmbH - Das Medienhaus. Disponível em: <http://www.bgbau.de/gisbau/publikationen/brosch/downloads/progress.pdf>

- Vicente, A.M.M., 2006. *A Utilização de Betumes Modificados com Borracha na Reabilitação de Pavimentos Flexíveis*. Dissertação de mestrado, Universidade do Porto. Disponível em: <http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/12775>.
- West, R.C. et al., 2010. *Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt - NCHRP Report 648*, Washington.
- Yildirim, Y., Solaimaniam, M. e Kennedy, T.M., 2000. *Mixing and Compaction Temperatures for Hot Mix Asphalt Concrete*, 1250-5. Center for Transportation Research. Disponível em: [http://www.utexas.edu/research/superpave/articles/1250\\_5.pdf](http://www.utexas.edu/research/superpave/articles/1250_5.pdf)
- Zaumanis, M., 2010. *Warm Mix Asphalt Investigation*. Dissertação de mestrado, Universidade Técnica de Riga.
- Zhao, G. e Guo, P., 2012. Workability of Sasobit Warm Mixture Asphalt. In *International Conference on Future Energy, Environment and Materials*. pp. 1230–1236. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610212002068>
- Zubaran, M., 2012. Misturas Asfálticas Sustentáveis - WMA. In *Seminário Técnico - Usinas de Asfalto e Controle Tecnológico*. Rio de Janeiro.

ANEXOS

---



## ANEXO A

### 1. Dimensão e Baridade dos Provetes para o ensaio à Sensibilidade à Água (MBAM)

Tabela A.1 – Dimensões médias e baridades dos provetes para o ensaio de determinação da Sensibilidade à Água.

Dimensões – EN 12697-29												
Mistura	MBQ						MBT					
Nº Proвете	1	2	3	4	8	11	1T	2T	4T	5T	7T	8T
Média das Espessuras (0,1mm)	62,0	62,2	63,5	61,5	61,2	61,9	62,8	63,6	63,7	63,0	62,5	62,4
Média dos Diâmetros (0,1mm)	101,7	101,6	101,6	101,7	101,7	101,7	101,8	101,7	101,6	101,6	101,6	101,6
Baridade – Método B (Provetes saturados com superfície seca – SSD) – EN 12697-6												
Nº Proвете	1	2	3	4	8	11	1T	2T	4T	5T	7T	8T
$\rho_{ssd}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	2,423	2,419	2,428	2,417	2,422	2,429	2,381	2,372	2,376	2,372	2,382	2,378

### 2. Volume dos Provetes do Subgrupo Húmido Após Vácuo (MBAM)

Tabela A.2 – Verificação da variação de volume dos provetes do subgrupo húmido após vácuo.

Dimensões – EN 12697-29						
Verificação das dimensões/volume dos provetes do conjunto húmido após vácuo						
Mistura	MBQ			MBT		
Nº Proвете	4	8	11	2T	7T	8T
Média das Espessuras (0,1mm)	61,6	61,2	61,9	63,5	62,4	62,5
Média dos Diâmetros (0,1mm)	101,8	101,8	101,8	101,7	101,6	101,7
VOLUME (mm <sup>3</sup> )	501644	497925	504307	516042	506653	507111
VOLUME antes do vácuo (mm <sup>3</sup> )	500322	497102	503233	516489	506531	505679
$\Delta V$ aceitável até 2%						
$\Delta V$ (%)	0,30	0,20	0,30	0,09	0,02	0,28



## ANEXO B

1. Dimensões das Lajes - *Wheel Tracking* – Mistura AC 20 Base (MBAM)

Tabela B.1 – Dimensões das lajes do ensaio de Pista.

Dimensões – EN 12697-29 (mm)				
Laje	1	2	1T	2T
Espessura (0,1mm)	63,0	62,8	60,8	61,7
Espessura (0,1mm)	62,6	61,7	62,5	62,7
Espessura (0,1mm)	61,0	60,8	61,3	61,5
Espessura (0,1mm)	61,9	62,7	62,3	62,7
Largura (0,1mm)	301,0	300,0	301,0	300,0
Largura (0,1mm)	301,0	301,0	301,0	300,0
Largura (0,1mm)	301,0	302,0	301,0	299,0
Largura (0,1mm)	300,0	302,0	301,0	299,0
Largura (0,1mm)	300,0	302,0	300,0	298,0
Largura (0,1mm)	300,0	302,0	300,0	298,0
Comprimento (0,1mm)	401,0	402,0	399,0	399,0
Comprimento (0,1mm)	401,0	400,5	399,0	399,0
Comprimento (0,1mm)	400,0	400,5	399,0	399,0
Comprimento (0,1mm)	400,0	400,0	399,0	399,0
Média das espessuras (0,1mm)	62,1	62,0	61,7	62,1
Média das larguras (0,1mm)	300,5	301,5	300,7	299,0
Média dos comprimentos (0,1mm)	400,5	400,8	399,0	399,0

2. Baridades das Lajes - *Wheel Tracking* – Mistura AC 20 Base (MBAM)

Tabela B.2 – Baridades das lajes do ensaio de Pista.

Baridade – EN 12697-6 (Mg/m <sup>3</sup> )			
MBQ	Geométrica (Método D)	$\frac{2,360}{2,373}$	2,367
MBQ	Provete Saturado com Superfície Seca (SSD) (Método B)	$\frac{2,397}{2,406}$	2,401
MBT	Geométrica (Método D)	$\frac{2,384}{2,405}$	2,395
MBT	Provete Saturado com Superfície Seca (SSD) (Método B)	$\frac{2,410}{2,410}$	2,410

### 3. Profundidade da Rodeira – $RD_{AIR}$ (MBAM)

Tabela B.3 – Evolução da rodeira ao longo do ensaio de Pista.

$RD_{AIR}$ (mm)		
Mistura	MBQ	MBT
Ciclo de Carga	Valor médio	Valor médio
0	0,00	0,19
250	1,48	1,77
500	1,82	2,10
1000	2,21	2,51
1500	2,49	2,79
2000	2,67	3,01
2500	2,85	3,18
3000	3,00	3,37
3500	3,13	3,50
4000	3,27	3,64
4500	3,39	3,78
5000	3,48	3,86
5500	3,58	3,97
6000	3,67	4,10
6500	3,76	4,17
7000	3,85	4,29
7500	3,91	4,35
8000	3,99	4,45
8500	4,07	4,53
9000	4,15	4,60
9500	4,21	4,74
10000	4,28	4,79



## ANEXO C

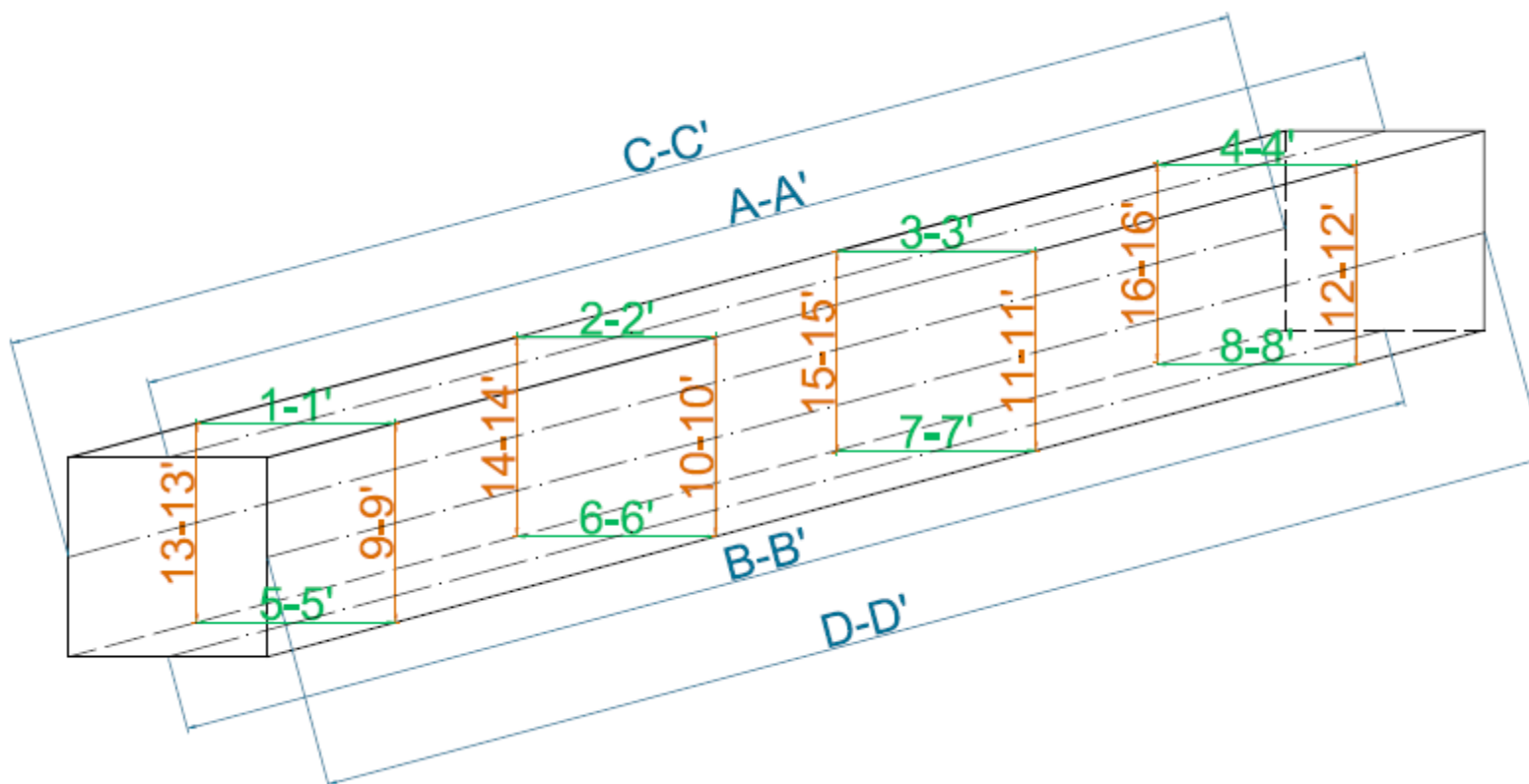
1. Dimensões das Vigas – *Four Bending Point* – Mistura AC 20 Base (MBAM)

Figura C.1 – Esquema ilustrativo das medições efetuadas nas vigas para o ensaio de flexão em 4 pontos.



### 1.1. Mistura Betuminosa Quente

Tabela C.1 – Dimensões e baridades das vigas da MBQ (Adaptado de Cordeiro (2012)).

Dimensões/Baridade – EN 12697-29/EN 12697-6																	
Mistura		MBQ															
Laje		3								4							
Viga		1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18
Comprimento (mm)	A-A'	380	380	380	380	380	380	379	378	380	381	381	381	381	381	381	381
	B-B'	380	380	380	380	380	380	380	379	380	380	381	381	381	381	381	381
	C-C'	380	380	380	380	380	380	379	379	379	380	380	380	381	380	381	380
	D-D'	379	379	379	379	380	379	378	378	380	380	380	381	381	381	381	381
Média dos Comprimentos (mm)		379,8	379,8	379,8	379,8	380,0	379,8	379,0	378,5	379,8	380,3	380,5	380,8	381,0	380,8	381,0	380,8
Largura (mm)	1-1'	60,9	61,0	60,0	60,6	59,8	60,6	59,7	59,8	60,1	59,7	60,2	60,3	60,3	60,3	60,3	60,2
	2-2'	60,7	60,1	60,1	60,5	60,1	60,4	60,1	60,0	60,0	60,0	60,1	60,3	60,5	60,3	60,2	60,2
	3-3'	60,2	59,9	60,4	60,3	60,8	60,0	60,5	60,6	59,9	60,0	60,0	60,3	60,5	60,5	60,1	60,5
	4-4'	59,8	59,8	60,0	60,1	60,9	59,5	60,6	60,1	60,0	59,5	60,2	60,1	60,5	60,3	60,1	60,5
	5-5'	61,0	61,1	60,0	60,5	60,0	60,6	59,9	60,0	60,0	60,0	60,2	60,3	60,3	60,4	60,4	60,2
	6-6'	60,8	60,4	60,2	60,4	60,3	60,4	60,1	60,1	60,0	59,9	60,1	60,4	60,4	60,4	60,3	60,4
	7-7'	60,4	60,2	60,2	60,3	60,6	60,0	60,4	60,3	59,8	59,8	60,1	60,3	60,4	60,4	60,2	60,4
	8-8'	60,1	60,3	60,0	60,3	60,8	59,7	60,6	60,3	59,8	59,8	60,2	60,2	60,3	60,4	60,2	60,5
	1-5'	60,9	61,0	60,0	60,5	59,9	60,6	59,8	59,9	60,0	59,9	60,2	60,3	60,3	60,3	60,4	60,2
	2-6'	60,7	60,3	60,1	60,5	60,2	60,4	60,1	60,1	60,0	60,0	60,1	60,4	60,4	60,4	60,3	60,3
	3-7'	60,3	60,1	60,3	60,3	60,7	60,0	60,4	60,4	59,9	59,9	60,1	60,3	60,4	60,4	60,2	60,5
	4-8'	60,0	60,1	60,0	60,2	60,9	59,6	60,6	60,2	59,9	59,6	60,2	60,1	60,4	60,4	60,2	60,5
Desvio Padrão		0,44	0,46	0,13	0,16	0,46	0,45	0,36	0,23	0,07	0,15	0,05	0,10	0,07	0,04	0,09	0,14
Média das Larguras (mm)		60,48	60,36	60,10	60,37	60,41	60,13	60,22	60,15	59,95	59,85	60,15	60,27	60,38	60,38	60,22	60,37
Altura (mm)	9-9'	60,8	60,1	60,6	60,4	61,0	60,5	60,9	61,1	60,6	61,0	60,2	60,6	60,5	60,2	60,6	60,3
	10-10'	60,8	60,5	60,3	60,3	60,5	60,7	60,7	60,8	60,8	60,2	59,9	60,7	60,2	60,3	60,4	60,5

11-11'	60,5	60,8	59,9	60,5	59,9	60,9	60,2	60,2	61,2	60,1	60,0	60,7	60,0	60,2	60,5	60,6
12-12'	60,3	61,0	59,9	61,4	60,0	61,1	60,3	60,1	62,0	60,2	59,9	60,8	60,9	60,7	61,0	61,2
13-13'	61,1	60,0	60,9	60,2	61,2	60,3	61,3	61,2	60,1	61,8	60,8	60,3	60,1	59,9	60,1	59,8
14-14'	60,8	60,4	60,5	59,8	60,8	60,3	60,9	60,9	60,2	61,4	60,4	60,5	59,7	59,7	60,1	60,0
15-15'	60,6	60,6	60,3	60,0	60,3	60,7	60,6	60,6	60,4	60,6	60,4	60,4	59,8	59,9	60,2	60,4
16-16'	60,4	60,8	60,1	60,5	60,3	61,0	60,4	60,3	61,4	60,4	60,4	60,6	60,2	60,3	60,2	60,4
9-13'	60,99	60,09	60,77	60,28	61,11	60,40	61,07	61,17	60,36	61,41	60,50	60,44	60,30	60,07	60,33	60,07
10-14'	60,80	60,42	60,41	60,02	60,64	60,49	60,76	60,85	60,50	60,80	60,13	60,59	59,96	60,00	60,23	60,27
11-15'	60,53	60,70	60,07	60,23	60,14	60,77	60,42	60,41	60,82	60,35	60,18	60,53	59,91	60,06	60,31	60,51
12-16'	60,34	60,91	59,96	60,98	60,11	61,07	60,38	60,21	61,69	60,29	60,14	60,70	60,55	60,48	60,60	60,82
Desvio Padrão	0,29	0,36	0,37	0,42	0,47	0,30	0,32	0,43	0,60	0,52	0,18	0,11	0,30	0,22	0,16	0,32
Média das Alturas (mm)	60,66	60,53	60,30	60,38	60,50	60,68	60,66	60,66	60,84	60,71	60,24	60,56	60,18	60,15	60,36	60,41
Peso (g)	3358,8	3341,8	3327,2	3336,3	3360,0	3342,9	3329,0	3309,3	3338,7	3322,6	3328,1	3360,8	3343,1	3344,0	3335,9	3346,6
Área da secção transversal (mm <sup>2</sup> )	3668,6	3653,1	3624,1	3644,5	3654,6	3649,0	3652,6	3648,7	3647,2	3633,3	3623,0	3650,3	3633,2	3631,8	3635,3	3646,9
Volume (mm <sup>3</sup> )	13931 51	13872 65	13762 52	13839 99	13887 48	13857 08	13843 35	13810 33	13850 24	13815 62	13785 52	13898 52	13842 49	13828 08	13850 49	13885 57
Densidade (Mg/m <sup>3</sup> )	2,411	2,409	2,418	2,410	2,419	2,413	2,405	2,396	2,411	2,405	2,414	2,418	2,415	2,418	2,409	2,410
Média	2,410								2,412							

## 1.2. Mistura Betuminosa Temperada

Tabela C.2 – Dimensões e baridades das vigas da MBT.

Dimensões/Baridade – EN 12697-29/EN 12697-6																			
Mistura		MBT																	
Laje		1									2								
Viga		1T	2T	3T	4T	5T	6T	7T	8T	9T	10T	11T	12T	13T	14T	15T	16T	17T	18T
Comprimento (mm)	A-A'	400,0	399,0	400,0	400,0	400,0	400,0	399,5	399,0	400,0	400,0	400,5	400,0	400,5	400,0	401,0	400,0	400,5	400,0
	B-B'	399,5	399,0	399,5	400,0	399,5	400,0	400,0	399,0	399,5	400,0	400,0	400,0	400,0	400,0	400,5	400,0	400,5	399,0
	C-C'	399,5	399,0	399,5	400,0	399,5	399,5	399,5	399,0	399,5	400,0	400,0	400,5	400,5	400,5	400,5	400,0	400,5	399,0
	D-D'	399,5	399,0	399,5	400,0	399,5	399,5	399,5	399,0	399,5	400,0	400,5	400,5	400,5	400,5	401,0	401,0	400,0	400,5
Média dos Comprimentos (mm)		399,6	399,0	399,6	400,0	399,6	399,8	399,6	399,0	399,6	400,0	400,3	400,3	400,4	400,4	400,8	400,0	400,5	399,4
Largura (mm)	1-1'	58,92	58,17	60,86	59,14	60,68	58,97	60,27	58,12	60,44	59,00	58,92	59,66	58,90	59,08	58,95	59,70	58,48	60,40
	2-2'	58,63	59,10	60,35	59,38	59,51	59,10	59,72	58,45	59,94	58,66	58,98	59,14	59,09	58,98	58,96	59,58	58,24	60,48
	3-3'	59,00	59,73	59,97	60,13	59,10	59,53	59,59	59,15	59,72	58,47	59,02	58,67	59,12	58,30	59,05	59,44	58,66	60,50
	4-4'	59,33	60,35	59,88	60,55	58,83	59,68	59,28	59,66	59,48	58,39	58,83	58,63	58,55	58,50	59,03	59,65	58,12	60,25
	5-5'	58,23	58,70	59,44	58,23	59,66	59,18	59,27	58,09	59,57	59,87	59,70	60,22	60,34	60,01	59,57	59,72	59,84	60,38
	6-6'	58,34	58,95	59,07	58,53	59,24	59,61	59,37	58,25	59,42	59,01	59,72	59,98	59,83	59,73	59,30	59,71	59,72	60,20
	7-7'	58,47	59,39	58,89	59,18	59,04	60,07	58,90	59,12	59,19	58,87	59,36	59,22	59,80	59,29	59,59	60,00	59,42	59,83
	8-8'	58,86	60,20	58,48	59,79	58,81	61,11	58,82	59,96	59,00	58,57	59,31	59,49	59,57	59,28	59,27	60,22	60,10	59,92
	1-5'	58,58	58,44	60,15	58,69	60,17	59,08	59,77	58,11	60,01	59,44	59,31	59,94	59,62	59,55	59,26	59,71	59,16	60,39
	2-6'	58,49	59,03	59,71	58,96	59,38	59,36	59,55	58,35	59,68	58,84	59,35	59,56	59,46	59,36	59,13	59,65	58,98	60,34
	3-7'	58,74	59,56	59,43	59,66	59,07	59,80	59,25	59,14	59,46	58,67	59,19	58,95	59,46	58,80	59,32	59,72	59,04	60,17
	4-8'	59,10	60,28	59,18	60,17	58,82	60,40	59,05	59,81	59,24	58,48	59,07	59,06	59,06	58,89	59,15	59,94	59,11	60,09
Desvio Padrão		0,27	0,78	0,42	0,67	0,59	0,58	0,32	0,78	0,33	0,41	0,13	0,46	0,24	0,36	0,09	0,13	0,08	0,14
Média das Larguras (mm)		58,72	59,32	59,62	59,37	59,36	59,66	59,40	58,85	59,60	58,86	59,23	59,38	59,40	59,15	59,22	59,75	59,07	60,25
Altura (mm)	9-9'	59,91	59,68	59,91	59,59	59,57	58,62	59,15	60,48	58,84	58,77	59,62	59,33	59,51	58,64	59,18	59,52	59,36	59,17
	10-10'	59,96	60,11	60,05	59,54	59,90	58,84	59,61	60,33	59,47	58,93	59,35	58,92	59,57	59,00	59,14	59,21	59,00	58,40

11-11'	59,91	60,63	60,10	59,56	59,98	59,47	60,10	60,05	60,55	59,18	59,05	58,63	59,42	59,35	58,78	59,10	58,99	58,31
12-12'	59,70	60,94	60,12	59,57	60,28	59,80	60,45	59,60	61,22	59,38	58,98	58,35	59,08	59,60	58,72	58,72	58,66	58,18
13-13'	60,10	59,70	59,66	59,49	59,79	59,32	59,51	60,71	58,89	58,66	59,20	58,76	59,60	58,78	58,82	59,13	59,26	59,73
14-14'	59,91	60,04	60,14	59,53	59,93	59,74	59,81	60,42	59,53	58,71	58,74	58,94	59,63	59,19	58,84	59,48	58,84	58,60
15-15'	59,82	60,27	60,26	59,56	60,08	60,31	60,17	60,01	59,85	59,05	58,62	58,40	59,49	59,21	58,63	59,07	58,69	58,57
16-16'	59,90	60,92	60,35	59,66	60,33	60,64	60,57	59,50	60,89	59,10	58,33	58,28	58,99	59,54	58,69	59,02	58,70	58,68
9-13'	60,01	59,69	59,79	59,54	59,68	58,97	59,33	60,60	58,87	58,72	59,41	59,05	59,56	58,71	59,00	59,33	59,31	59,45
10-14'	59,94	60,08	60,10	59,54	59,92	59,29	59,71	60,38	59,50	58,82	59,05	58,93	59,60	59,10	58,99	59,35	58,92	58,50
11-15'	59,87	60,45	60,18	59,56	60,03	59,89	60,14	60,03	60,20	59,12	58,84	58,52	59,46	59,28	58,71	59,09	58,84	58,44
12-16'	59,80	60,93	60,24	59,62	60,31	60,22	60,51	59,55	61,06	59,24	58,66	58,32	59,04	59,57	58,71	58,87	58,68	58,43
Desvio Padrão	0,09	0,53	0,20	0,04	0,26	0,57	0,51	0,46	0,94	0,25	0,32	0,34	0,26	0,36	0,17	0,22	0,27	0,50
Média das Alturas (mm)	59,90	60,29	60,07	59,56	59,98	59,59	59,92	60,14	59,91	58,97	58,99	58,70	59,41	59,16	58,85	59,16	58,94	58,71
Peso (g)	3385,9	3429,8	3427,0	3418,3	3414,9	3408,6	3433,9	3402,0	3352,7	3344,8	3351,4	3340,7	3379,6	3345,2	3360,0	3363,2	3336,8	3324,9
Área da secção transversal (mm <sup>2</sup> )	3517,6	3576,4	3581,4	3536,0	3560,5	3555,1	3559,5	3539,1	3570,0	3470,8	3493,8	3485,5	3529,0	3499,3	3484,8	3534,7	3481,6	3536,7
Volume (mm <sup>3</sup> )	1405701	1426986	1431236	1414401	1422859	1421137	1422454	1412098	1426677	1388331	1398376	1395055	1412935	1401038	1396535	1413894	1394375	1412463
Densidade (Mg/m <sup>3</sup> )	2,409	2,404	2,394	2,417	2,400	2,399	2,414	2,409	2,350	2,409	2,397	2,395	2,392	2,388	2,406	2,379	2,393	2,354
Média	2,399										2,390							

## 2. Módulo de Rigidez e Ângulo de Fase (MBAM)

### 2.1. *Mistura Betuminosa Quente*

Tabela C.3 – Síntese dos resultados relativos ao varrimento de frequências da MBQ.

Varrimento de Frequências – MBQ								
Espectro do Pré-teste (Hz)	0,1	0,2	1	5	10	20	50	0,1
Módulo de Rigidez	5342	6344	8808	11666	12846	14031	15370	5395
Energia Dissipada	15,3	16,5	21,4	16,8	16,8	18,1	19,8	15,6
Ângulo de Fase	22,2	20,3	16,4	12,2	11,1	10,5	10,8	22,4

### 2.2. *Mistura Betuminosa Temperada*

Tabela C.4 – Síntese dos resultados relativos ao varrimento de frequências da MBT.

Varrimento de Frequências – MBT								
Espectro do Pré-teste (Hz)	0,1	0,2	1	5	10	20	50	0,1
Módulo de Rigidez	4443	5240	7621	10235	11374	12556	13844	4422
Energia Dissipada	14,1	15,7	20,0	18,8	19,4	20,6	22,1	14,6
Ângulo de Fase	25,5	23,8	19,2	14,7	13,5	12,5	12,5	25,7





### 3. Resistência à Fadiga (MBAM)

#### 3.1. Mistura Betuminosa Quente

Tabela C.5 – Síntese de resultados relativos ao ensaio de resistência à fadiga da MBQ (Adaptado de Cordeiro (2012)).

Resistência à Fadiga – EN 12697-24										
Mistura			MBQ							
Níveis de extensão (με)	Viga	ρ (Mg/m <sup>3</sup> )	ρ Média (Mg/m <sup>3</sup> )	Módulo de rigidez inicial (100º ciclo) (MPa)	Nº de ciclos até rotura	Nº médio de ciclos até rotura	Desvio-padrão	Ângulo de fase inicial (°)	Ângulo de fase final (°)	Energia dissipada acumulada (MJ/m <sup>3</sup> )
200	5	2,419	2,414	11701	185610	738096	392443	15,2	21,9	69186
200	7	2,412		11181	1094577			15,4	24,1	371108
200	13	2,418		-	-			-	-	-
200	14	2,418		11827	465945			15,3	22,6	165888
200	17	2,408		12106	966091			14,9	23,4	327524
200	18	2,410		12580	978257			15,0	24,5	344827
300	1	2,411	2,410	11701	47956	51151	10547	17,4	25,9	39004
300	3	2,418		11643	36615			17,6	25,8	30395
300	9	2,396		11086	66578			17,9	26,9	51828
300	11	2,405		11335	59830			16,6	25,5	45752
300	12	2,414		11594	48712			17,2	24,7	38056
300	16	2,418		12062	47217			16,7	25,2	38166
400	2	2,409	2,412	10254	7295	8591	1932	19,1	25,5	9911
400	4	2,411		10342	5911			19,0	24,7	7885
400	6	2,422		-	-			-	-	-
400	8	2,405		10566	10566			19,7	26,8	14496
400	10	2,411		10819	9876			19,2	26,7	13797
400	15	2,415		11085	9305			19,1	26,1	13442

### 3.1.1. Gráficos do Módulo de Rigidez, Energia Dissipada e Ângulo de Fase

#### A. Patamar de extensão de 200 $\mu$ m

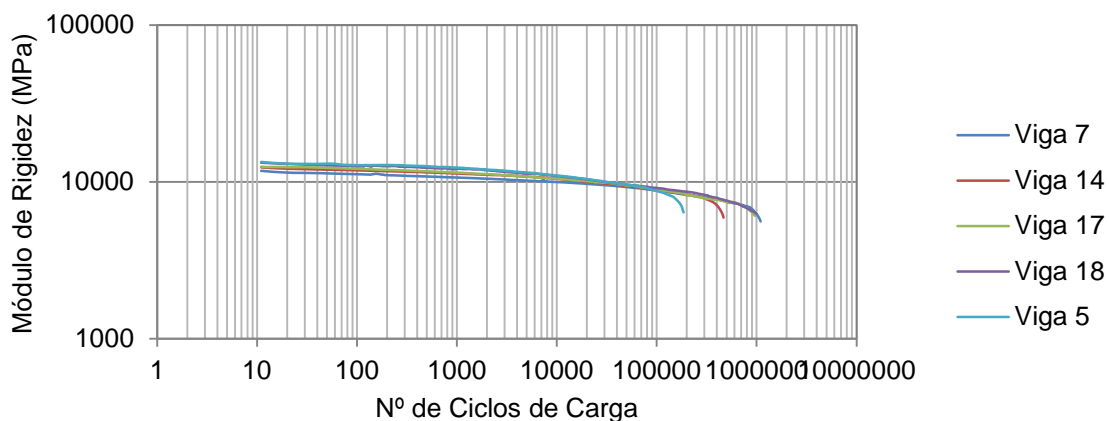


Gráfico C.1 – Módulo de rigidez das vigas da MBQ ensaiada ao patamar de extensão 200 $\mu$ m.

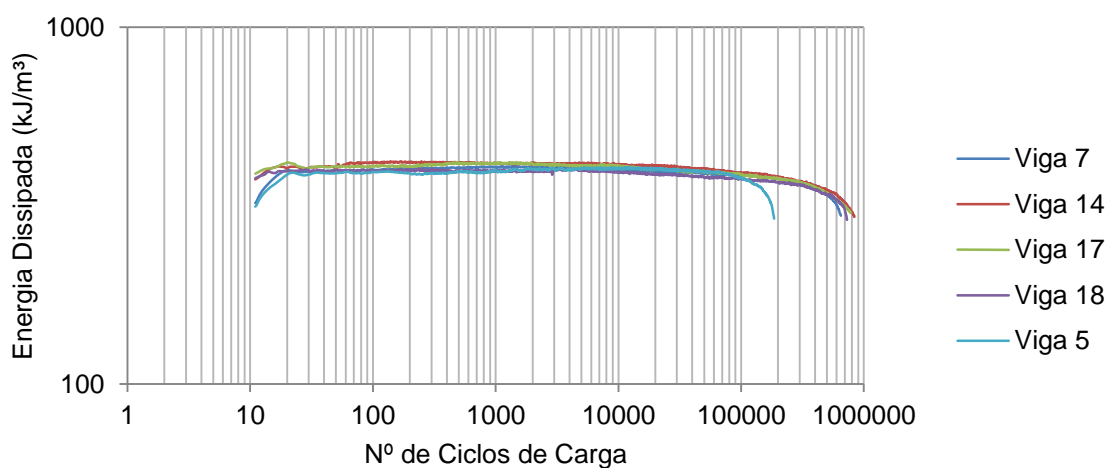


Gráfico C.2 – Energia dissipada das vigas da MBQ ensaiada ao patamar de extensão 200 $\mu$ m.

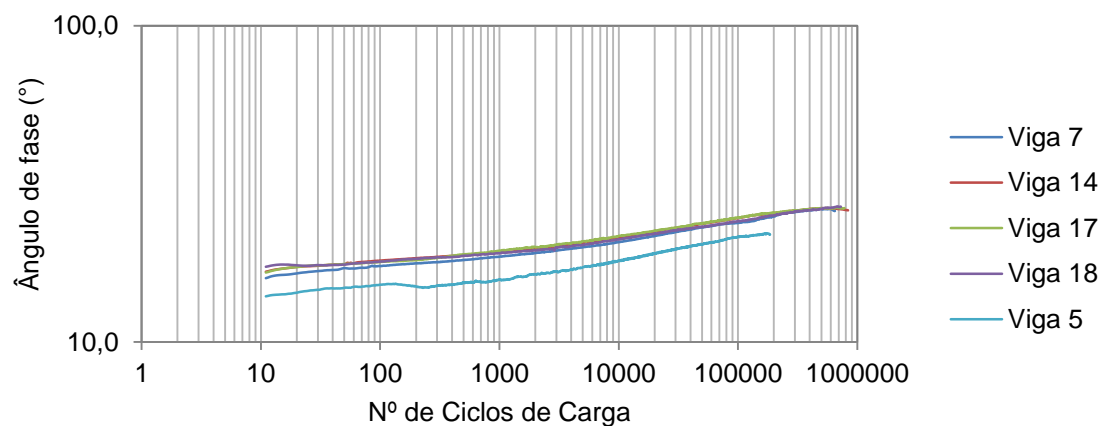
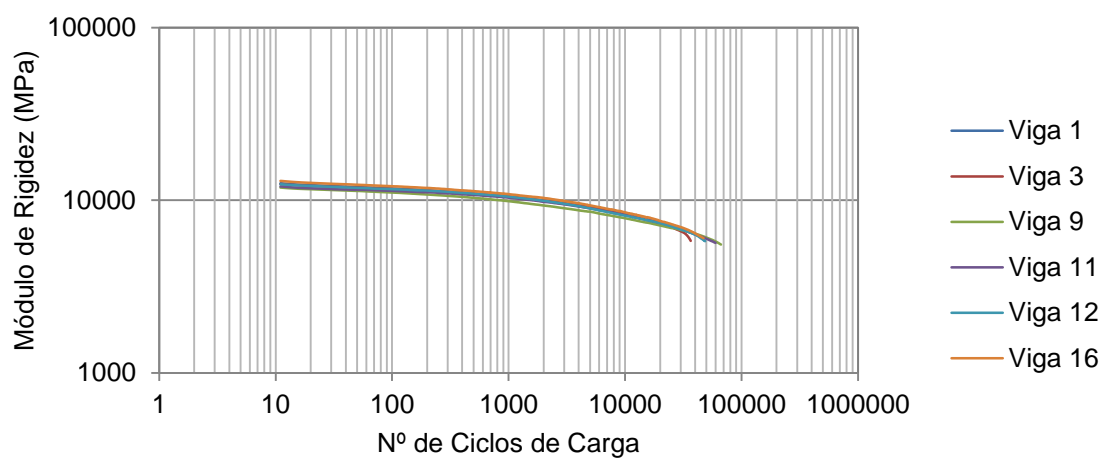
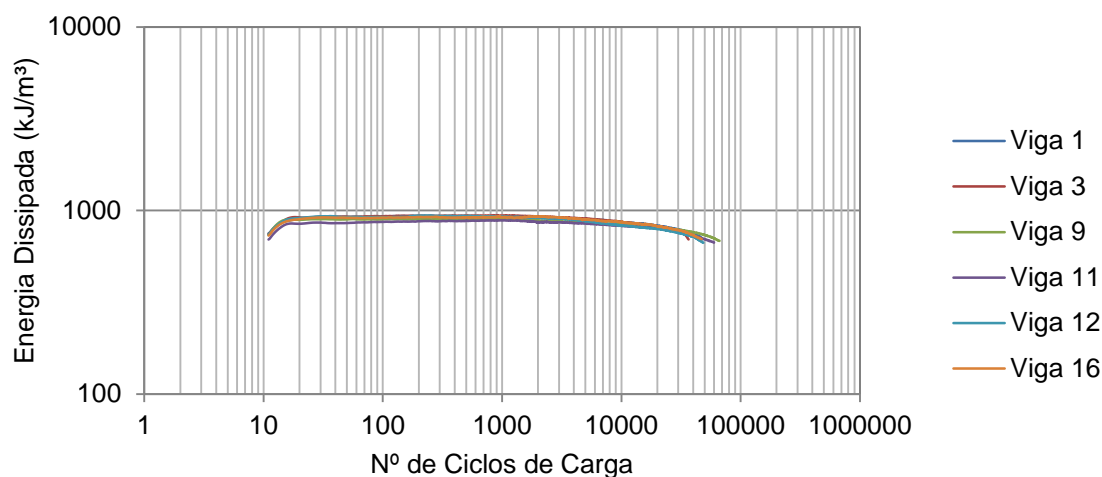
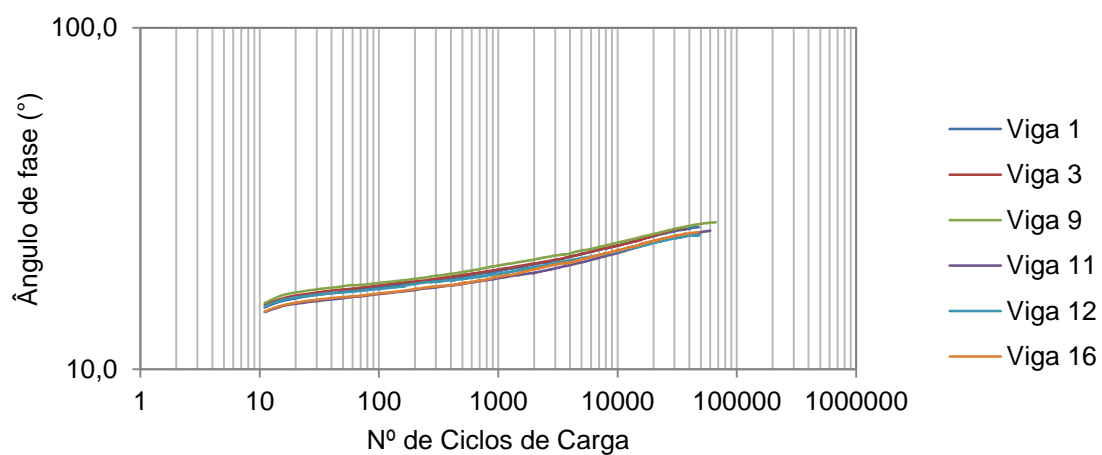
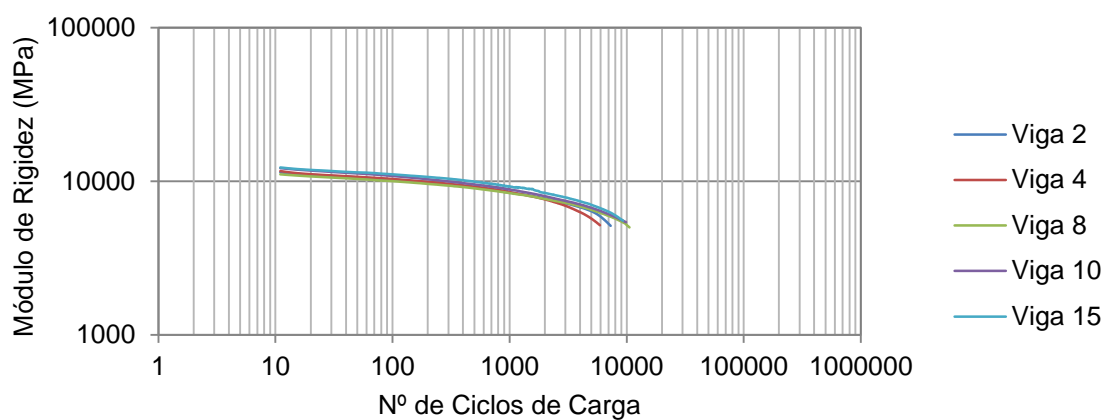
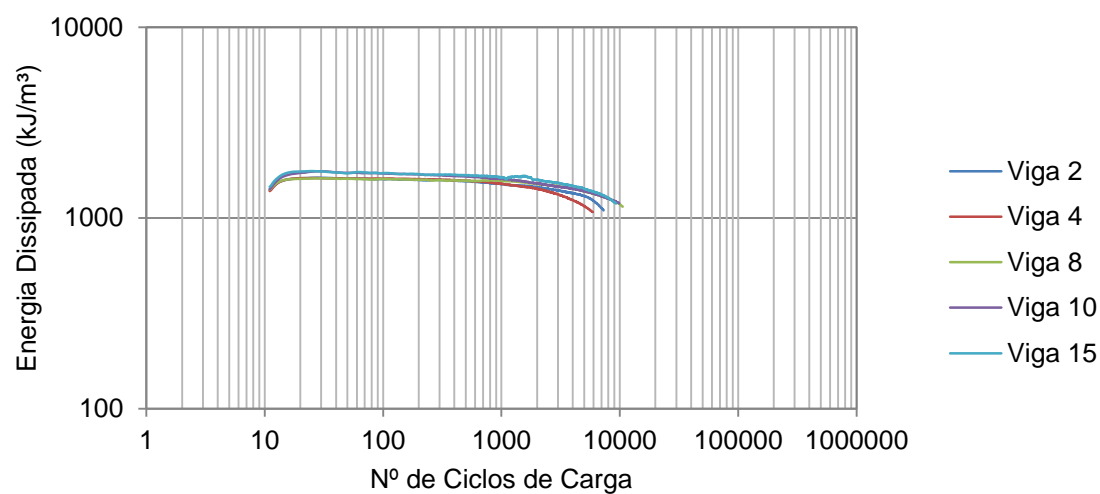
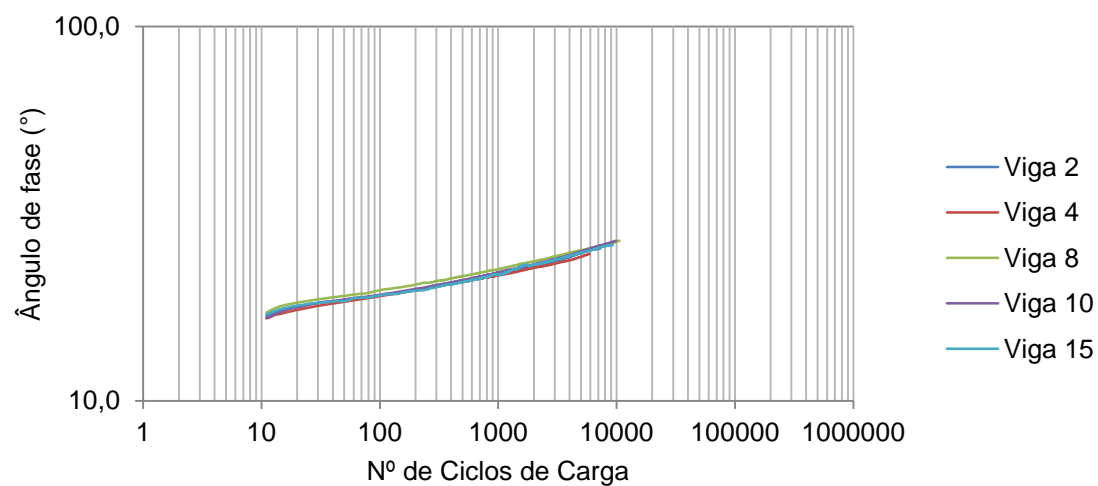


Gráfico C.3 – Ângulo de fase das vigas da MBQ ensaiada ao patamar de extensão 200 $\mu$ m.

B. Patamar de Extensão de 300 $\mu$ mGráfico C.4 – Módulo de rigidez das vigas da MBQ ensaiada ao patamar de extensão 300 $\mu$ m.Gráfico C.5 – Energia dissipada das vigas da MBQ ensaiada ao patamar de extensão 300 $\mu$ m.Gráfico C.6 – Ângulo de fase das vigas da MBQ ensaiada ao patamar de extensão 300 $\mu$ m.

C. Patamar de Extensão de 400 $\mu$ mGráfico C.7 – Módulo de rigidez das vigas da MBQ ensaiada ao patamar de extensão 400 $\mu$ m.Gráfico C.8 – Energia dissipada das vigas da MBQ ensaiada ao patamar de extensão 400 $\mu$ m.Gráfico C.9 – Ângulo de fase das vigas da MBQ ensaiada ao patamar de extensão 400 $\mu$ m.

### 3.2. Mistura Betuminosa Temperada

Tabela C.6 – Síntese de resultados relativos ao ensaio de resistência à fadiga da MBT.

Resistência à Fadiga – EN 12697-24										
Mistura			MBT							
Níveis de extensão (με)	Viga	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	ρ Média (Mg/m <sup>3</sup> )	Módulo de rigidez inicial (100º ciclo) (MPa)	Nº de ciclos até rotura	Nº médio de ciclos até rotura	Desvio-padrão	Ângulo de fase inicial (º)	Ângulo de fase final (º)	Energia dissipada acumulada (MJ/m <sup>3</sup> )
200	3	2,394	2,388	11272	649834	748971	79415	17,4	26,0	249491
200	10	2,409		10633	836142			18,1	26,1	297655
200	17	2,393		10535	781616			17,9	26,5	276674
200	18	2,354		10185	728292			18,0	26,8	255655
300	7	2,414	2,403	10580	47179	71916	26495	19,1	27,6	38455
300	8	2,409		9813	50962			19,6	27,3	39457
300	11	2,396		9813	97128			20,5	30,3	76859
300	13	2,392		9512	92394			20,5	30,6	71844
400	4	2,417	2,400	9533	14249	14423	2205	21,2	29,5	18730
400	6	2,399		9413	12372			21,1	29,8	17529
400	12	2,396		8860	13551			22,9	31,0	18378
400	14	2,388		8547	17520			22,7	31,5	23004

### 3.2.1. Gráficos do Módulo de Rigidez, Energia Dissipada e Ângulo de Fase

#### A. Patamar de Extensão de 200 $\mu$ m

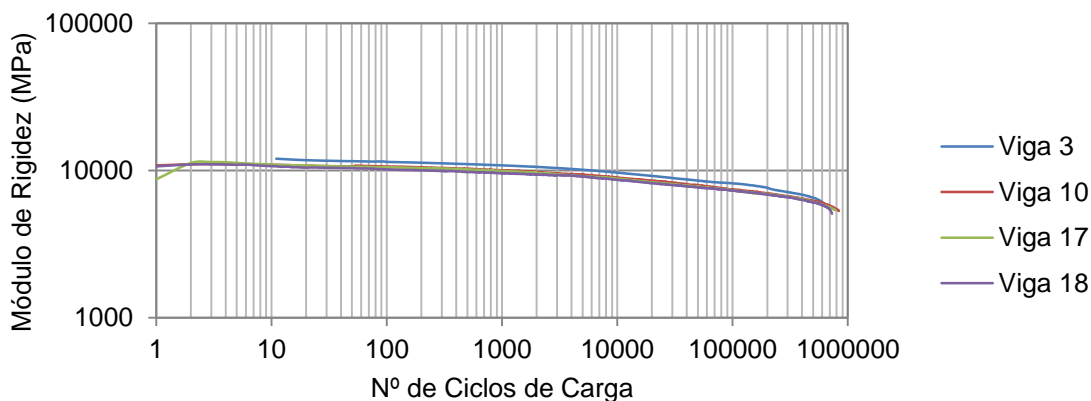


Gráfico C.10 – Módulo de rigidez das vigas da MBT ensaiada ao patamar de extensão 200 $\mu$ m.

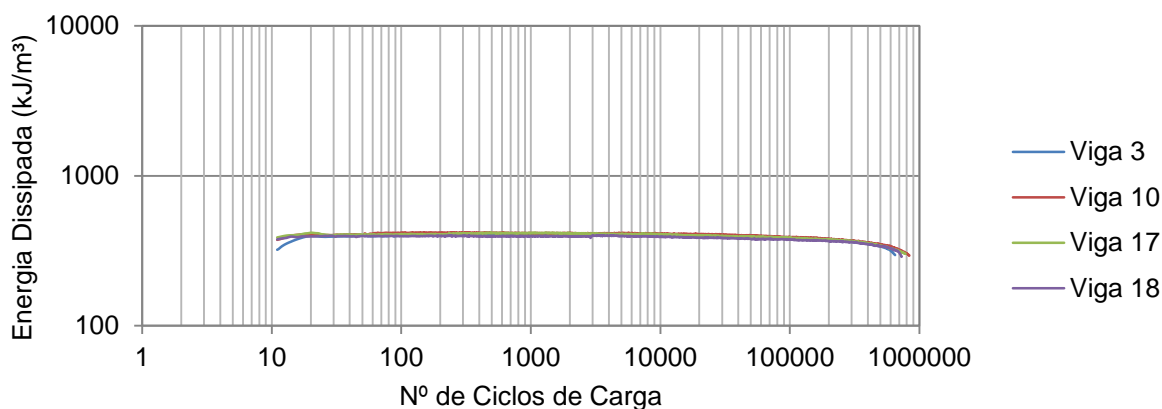


Gráfico C.11 – Energia dissipada das vigas da MBT ensaiada ao patamar de extensão 200 $\mu$ m.

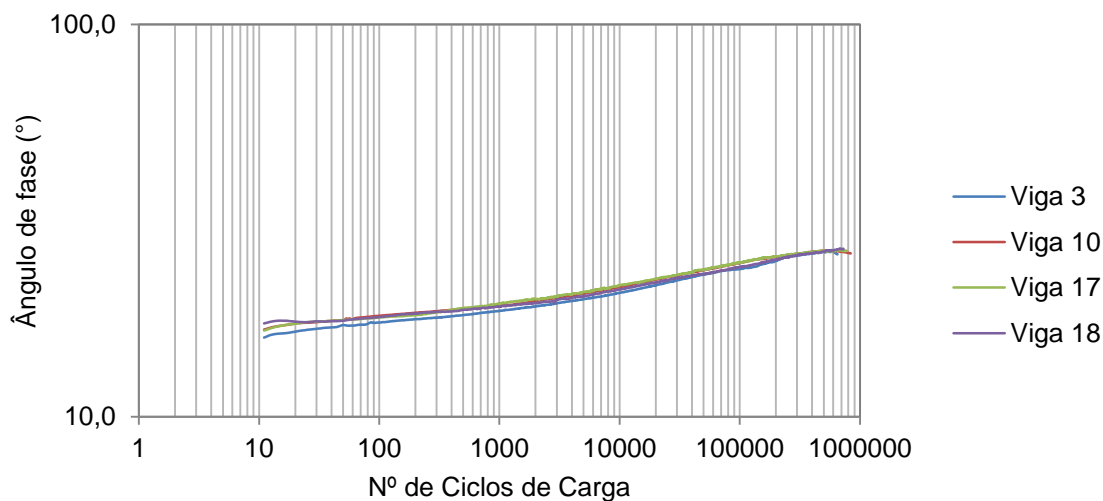
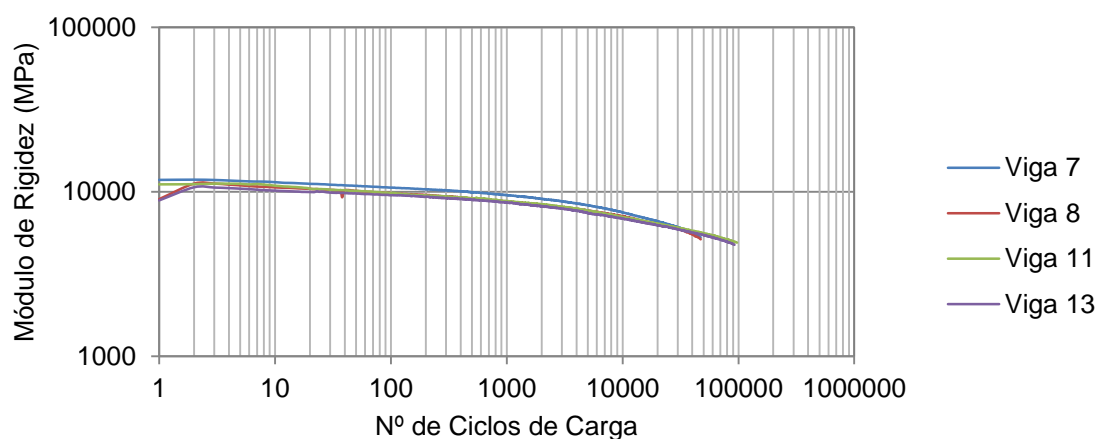
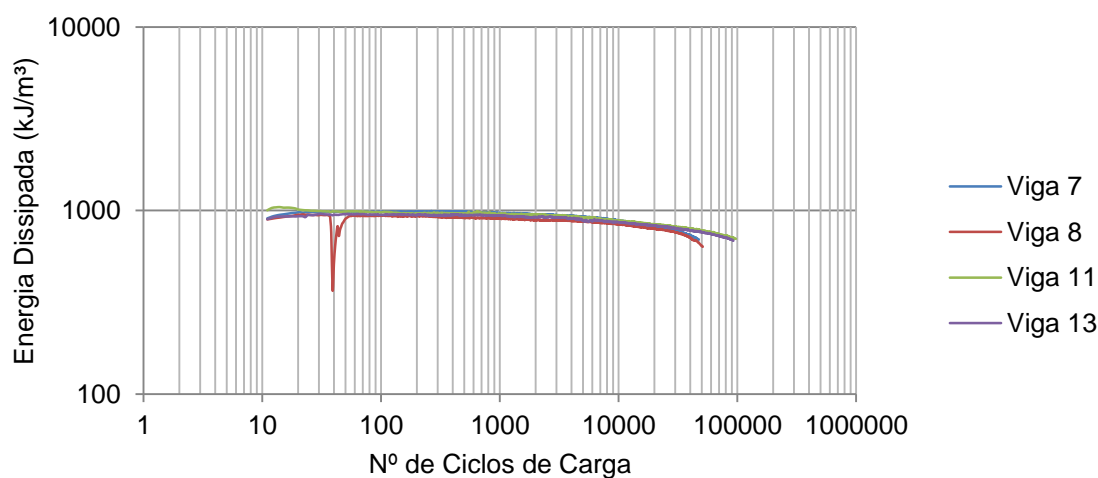
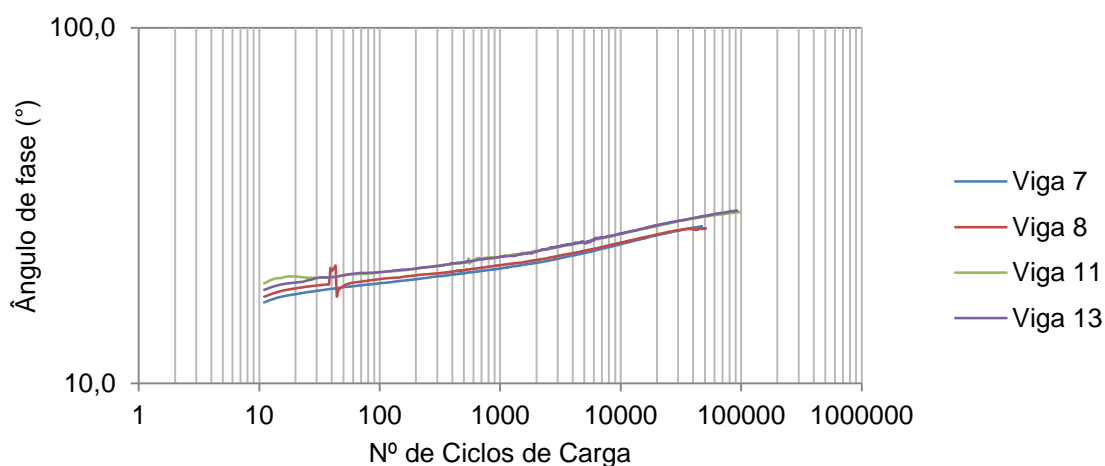
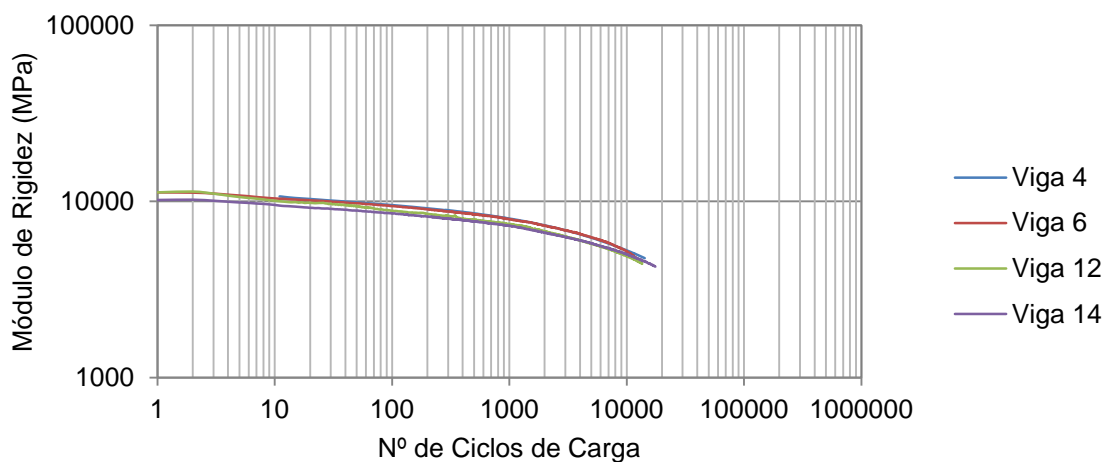
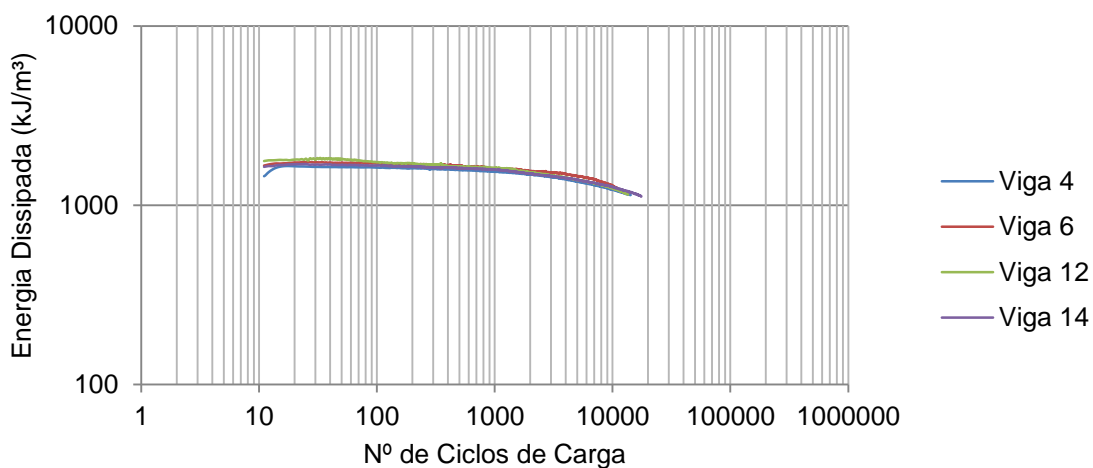
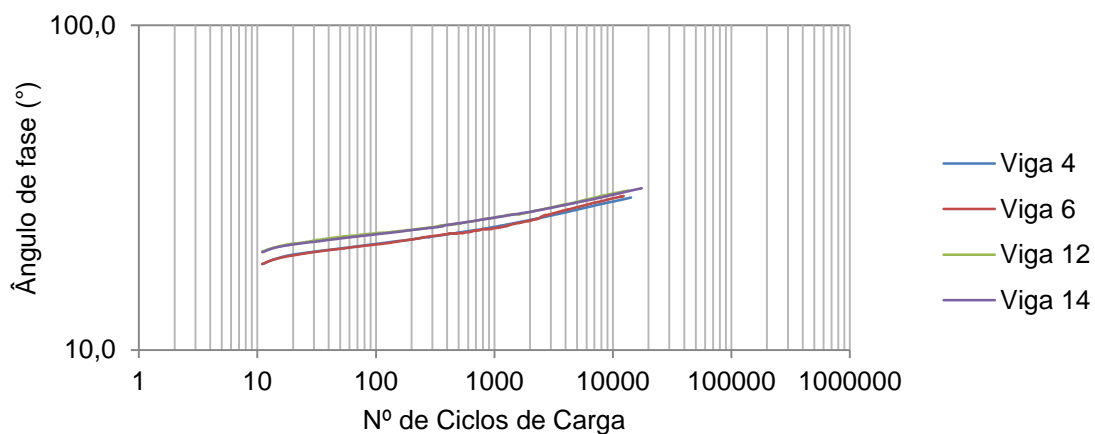


Gráfico C.12 – Ângulo de fase das vigas da MBT ensaiada ao patamar de extensão 200 $\mu$ m.

B. Patamar de Extensão de 300 $\mu$ mGráfico C.13 – Módulo de rigidez das vigas da MBT ensaiada ao patamar de extensão 300 $\mu$ m.Gráfico C.14 – Energia dissipada das vigas da MBT ensaiada ao patamar de extensão 300 $\mu$ m.Gráfico C.15 – Ângulo de fase das vigas da MBT ensaiada ao patamar de extensão 300 $\mu$ m.

C. Extensão de 400 $\mu$ mGráfico C.16 – Módulo de rigidez das vigas da MBT ensaiada ao patamar de extensão 400 $\mu$ m.Gráfico C.17 – Energia dissipada das vigas da MBT ensaiada ao patamar de extensão 400 $\mu$ m.Gráfico C.18 – Ângulo de fase das vigas da MBT ensaiada ao patamar de extensão 400 $\mu$ m.



## ANEXO D

## 1. Requisitos da Mistura AC 14 Surf (BBr) – CEEP

Tabela D.1 – Requisitos da mistura do tipo AC 14 Surf (BBr), segundo o CEEP 14.03.

Quadro 14.03.2n: Camada de misturas betuminosas a quente					
Camada de desgaste – Requisitos/Propriedades					
Camada de desgaste					
Requisitos/Propriedades	Referência normativa	Condições específicas de ensaio	Unid.	AC 20 base (MBAM) Rubrica 14.03.2.4.4	
Características Marshall	Estabilid., máx.	EN 12697-34	Moldagem dos provetes: EN 12697-30 75 pancadas	kN	$S_{máx}15^{(a)}$
	Estabilid., mín.			kN	$S_{mín}12,5$
	Deform., máx.			mm	F4
	Deform., mín.			mm	F2
	Quoc. Marshall, mín.			kN/mm	$Q_{mín}3$
Vazios na mistura de agregados (VMA), mín.	EN 12697-8	EN 12697-8 Calculada com base na baridade máxima teórica <sup>(b)</sup> – determinada segundo a EN 12697-5, procedimento A, em água e na baridade <sup>(c)</sup> determinada segundo a EN 12697-6, procedimento B, provete saturado com a superfície seca	%	$VM_{mín}14$	
Porosidade, Vm	EN 12697-8	EN 12697-8 Calculada com base na baridade máxima teórica <sup>(b)</sup> determinada segundo a EN 12697-5, procedimento A, em água e na baridade <sup>(c)</sup> determinada segundo a EN 12697-6, procedimento B, provete saturado com a superfície seca	%	$V_{mín}3,0$ - $V_{máx}6$	
Relação ponderal de fíler/ligante	-	Estudo de formulação (item 15.03.02)	%	Item 14.03.0-3	
Índice de Resistência Conservada (IRC) em ensaio de compressão Marshall, mín	MIL-STD-620A	Moldagem dos provetes: EN 12697-30 75 pancadas <sup>(d)</sup>	%	80	
Resistência à Deformação Permanente ("Wheel tracking")	Taxa de deformação, $WTS_{AIR}$	EN 12697-22	Equipamento pequeno, procedimento B, acondicionado ao ar, temperatura do ensaio 60°C	Mm/10 <sup>3</sup> ciclos de carga	Categoria a declarar
	Profundidade de rodeira máxima, $PRD_{AIR}$			%	Categoria a declarar
% de ligante, mín	-	-	%	$B_{mín}4,0^{(e)}$	
Sensibilidade à água, ITSR	EN 12697-12	Moldagem dos provetes: EN 12697-30 75 pancadas Temperatura de ensaio: 15°C <sup>(g)</sup>	%	Categoria a declarar	
Permeabilidade <i>in situ</i>	EN 12697-40	-	s	NA	
Permeabilidade <i>in situ</i> (permeâmetro LCS)	NLT 327	-	s		
Perda de massa, PL	EN 12697-17	Moldagem dos provetes: EN 12697-30	%		



		75 pancadas	
		Temperatura de ensaio: 25°C	
		Moldagem dos provetes:	
		EN 12697-30	
Ensaio Cântabro húmido (h), máx	NLT 362 (i)	Perda por desgaste: NP EN	%
		1097-2	
		Temperatura de ensaio: 25°C	

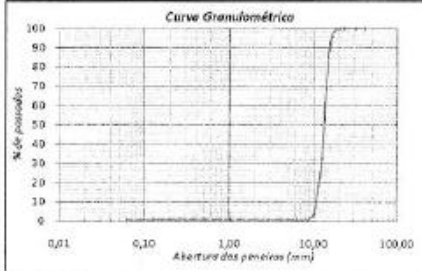
## ANEXO E

## 1. Fichas Técnicas dos Agregados

Apresentam-se neste anexo as fichas técnicas dos agregados referentes à mistura do AC 14 Surf (BBr).

## 1.1. Brita 10/16

 <b>ALVES RIBEIRO, S.A.</b> Sede: Rua Sanchez Coelho, 9F-3º, 1849-020 Lisboa Pedreira: Moita da Ladra nº 2022, 2625-032 Vialonga, Vila Franca de Xira Alameda Construção nº 14 Matriculada na C. R. C. de Lisboa com o número único de matrícula e de pessoa colectiva 505016526 Capital Social 113 200 00,00€	<b>Ficha Técnica do Produto</b>  <b>0866</b> <b>05</b>
	<b>0866-CPD-2005/CE.037</b> NP EN 13043-Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação -2- NP EN 12620 + A1-Agregados para betão
<b>Caracterização do Produto</b>	<b>Produto:</b> Brita 2
	<b>Dimensão do Agregado:</b> 10/16
	<b>Origem:</b> Pedreira Moita da Ladra-Vialonga
	<b>Identificação Petrográfica:</b> Basalto

Propriedades	NP EN 13043	NP EN 12620	Granulometria Típica			
Forma das partículas			Abertura do peneiro (mm)	% de passados, em massa	Máximo	Mínimo
Índice de achatamento		$F_{15}$	40,00	100		
Índice de forma		$S_{15}$	31,50	100	100	100
Granulometria	$G_{60}/10$	$G_{60}/20$	22,40	100	100	100
			20,00	100		
Massa volumica das partículas	$\rho_p 3,00 \pm 0,05 \text{ Mg/m}^3$		16,00	96	99	90
	$\rho_{rel} 2,89 \pm 0,05 \text{ Mg/m}^3$		14,00	70		
	$\rho_{rel} 2,94 \pm 0,05 \text{ Mg/m}^3$		12,50	33		
			10,00	4	10	0
Limpeza			8,00	1		
Teor de finos	$f_0$	$f_{1,5}$	6,30	1		
Qualidade dos finos		NA	4,00	1	2	0
Afinidade aos ligantes betuminosos	DND	NA	2,00	1		
Resistência à fragmentação/esmagamento		$LA_{10}$	1,00	1		
Resistência ao polimento		DND	0,500	1		
Resistência à abrasão		DND	0,250	1		
Resistência ao desgaste por atrito		$M_{VE}10$	0,125	1		
Resistência à abrasão provocada por pneus pilotados	DND	NA	0,063	0,5		
Resistência ao choque térmico	$V_{L1}$	NA				
Resistência ao gelo-degelo		DND				
Composição/teor						
Cloreto	NA	< 0,01%				
Sulfatos solúveis em ácido	NA	AS <sub>0,2</sub>				
Enxofre total	NA	0,02%				
Contaminantes Leves	$m_{LVO}0,1$	< 0,1%				
Teor de Humus	NA	Não contém matéria orgânica				
Teor de carbonato	NA	DND				
Estabilidade volumétrica						
Retração por secagem	NA	0,038%				
Absorção de água		$0,9 \pm 0,1 \% - W_{Ag1}$				
Emissão de radioactividade		DND				
Libertação de metais pesados		DND				
Libertação de compostos de carbono poliaromáticos		DND				
Libertação de outras substâncias perigosas		DND				
Durabilidade face à meteorização		DND				
Durabilidade face à reacção álcalis-silica	NA	14 dias - 0,01%				

NA- Não aplicável, DND-Desempenho não determinado

Aprovado por:



Data:

07-07-2011

Figura E.1 – Ficha técnica da brita basáltica de dimensões 10/16.

## 1.2. Brita 8/12,5



Lena Agregados, S.A.  
Quita da Sardinha - Aparto 1014 Santa catarina da Serra  
2496-907 Santa Catarina da Serra - Portugal

06



Rev.06

## Ficha Técnica de Produto

Produto: Brita Basalto Nº1 RM (8/12,5 mm)

Centro de Produção:

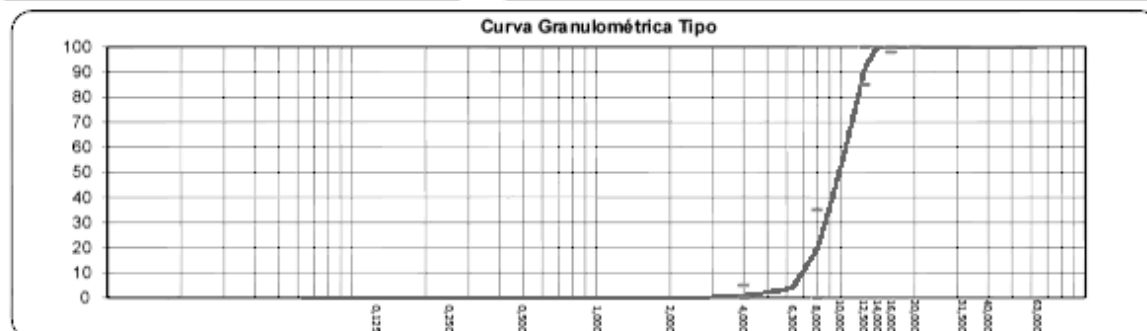
Rio Maior

Norma de Produto: NP EN 13043:2004/AC:2010 - Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação

Peneiro (mm)	Valores Típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)	Características	NP EN 13043
				Certificado CE	1592-CPD-0609
63,000	100			Dimensão (d/D)	8/12,5 mm
40,000	100			Granulometria	G <sub>C</sub> 85/35
31,500	100			Tolerância da Granulometria Típica	GT <sub>C</sub> 10
20,000	100	100	100	Teor de Finos	f <sub>i</sub>
16,000	100	98	100	Qualidade dos Finos	NA
14,000	100			Índice de Achatamento	FI <sub>1,5</sub>
12,500	92	85	100	Índice de Forma	SI <sub>15</sub>
10,000	53			Coefficiente de Los Angeles	LA <sub>25</sub>
8,000	20	0	35	Coefficiente de micro-Deval	M <sub>DE</sub> 20
6,300	4			Coefficiente de Polimento Acelerado	PSV <sub>90</sub>
4,000	1	0	5	Massa Volúmica	
2,000	0			material impermeável	2,95 Mg/m <sup>3</sup>
1,000	0			partículas secas em estufa	2,86 Mg/m <sup>3</sup>
0,500	0			partículas saturadas	2,89 Mg/m <sup>3</sup>
0,250	0			Absorção de Água	1,1 %
0,125	0			Baridade	1,51 Mg/m <sup>3</sup>
0,063	0,2			Porcentagem de Vazios	47 %
				Teor de Cloretos	NA
				Teor de Sulfuretos	NA
				Reacção álcalis-silica	NA
				Sulfatos solúveis em ácido	NA
				Teor de Enxofre	NA
				Teor de Húmus	NA
				Teor de Ácido Fúlvico	NA
				Contaminantes Leves	NA
				Contaminantes orgânicos pelo método da argamassa	
				Aumento do tempo de presa	NA
				Diminuição da resistência à compressão aos 28 dias	NA
				Retração por secagem	NA

## Observações:

NA - Não aplicável



Elaborou: (ORIGINAL ASSINADO)

Aprovou:

(ORIGINAL ASSINADO)

Emitido:

06-12-2011

Doc.L041

1/1

Figura E.2 – Ficha técnica da brita basáltica de dimensões 8/12,5.

## 1.3. Pó de Pedra 0/6



## FICHA TÉCNICA DE PRODUTO

Designação Comercial:	Pó de Pedra 0/6	Origem:	Vale Grande
Utilização:	NP EN 13242:2002+A1:2010 (Materiais não ligados e ligados); NP EN 13043 (Misturas betuminosas); NP EN 12620:2002+A1:2010 (Betão)		

## CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO

Descrição petrográfica:	Calcário de precipitação, rijo de aspecto compacto, homogêneo com granularidade muito fina (afanítico), de cor branca/bege e cinzento.
-------------------------	--

## Distribuição granulométrica

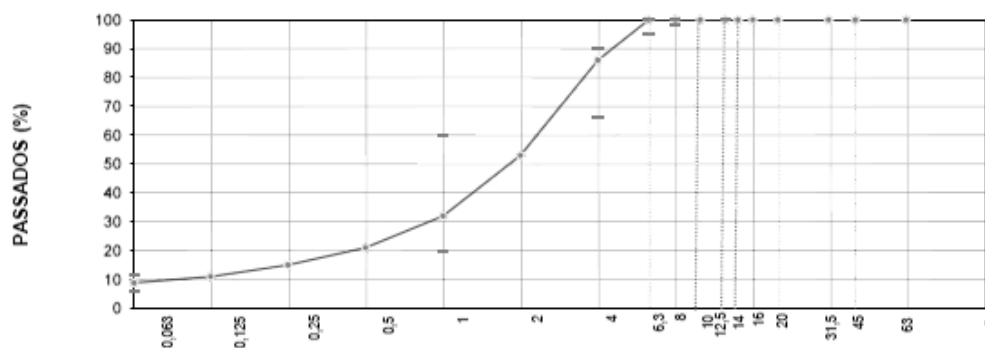
Peneiro (mm)	Valores típicos (%)	Limites Mínimos (%)	Limites Máximos (%)
63	100		
40	100		
31,5	100		
20	100		
16	100		
14	100		
12,5	100	100	100
10	100		
8	100	98	100
6,3	100	95	100
4	86	66	90
2	53		
1	32	20	60
0,5	21		
0,25	15		
0,125	11		
0,063	8,8	5,8	11,8

## Controlo da produção

Parâmetro	Típico	Mínimo	Máximo
MF	3,81	3,31	4,31
CF	4,68	4,18	5,18

## Outras características

Característica	NP EN 13242	NP EN 13043	NP EN 12620
Dimensão nominal (d/D)	0/6		
Granulometria	G <sub>85</sub> -G <sub>T</sub> 20	G <sub>85</sub> -G <sub>T</sub> 20	G <sub>85</sub>
Teor de finos	f <sub>16</sub>		
Qualidade dos finos	DND		
Massa Volumica <sup>1)</sup>			
-- Material impermeável	2,70 ± 0,05 Mg/m <sup>3</sup>		
-- Partículas secas em estufa	2,65 ± 0,05 Mg/m <sup>3</sup>		
-- Partículas saturadas	2,67 ± 0,05 Mg/m <sup>3</sup>		
Absorção de Água	≤ 1,0 %		
Percentagem de partículas quebradas	C <sub>603</sub>	C <sub>606</sub>	
Teor sulfatos solúveis em ácido <sup>2)</sup>	AS <sub>0,2</sub>		AS <sub>0,2</sub>
Teor de enxofre total <sup>2)</sup>	S <sub>T</sub>		≤ 1%
Teor de húmus <sup>2)</sup>	Isento		Isento
Contaminantes orgânicos leves			DND
Resistência à Fragmentação	DND		
Resistência ao Choque Térmico		DND	
Resistência ao Desgaste	DND		
Resistência ao Polimento			DND
Afinidade das Partículas ao betume			DND
Resistência à Abrasão			DND
Resistência ao Gelo-Degelo			DND
Retração por secagem <sup>2)</sup>			0,038%
Teor Cloretos			≤ 0,01%
Reação Alcali-Silica			DND



<sup>1)</sup> Valor determinado sobre outro produto com a mesma origem (Fracção 0,063/4 Tout-Venart 1°)

<sup>2)</sup> Valor determinado sobre outro produto com a mesma origem (Pó de Pedra 0/4)

DND - Desempenho não determinado

Data: 07-02-2013

O Responsável: *Bequero*



Figura E.3 – Ficha técnica do pó de pedra calcário de dimensões 0/6.

## 1.4. Fíler Comercial



## DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

## CILAS 920 Líquido

Faixa : 0.30 mu - 400.00 mu / 30 Classes



Ref da amostra : RC 480  
 Type produit : FILER  
 Client : TESTE  
 Comentários : L5  
 Líquido : Água  
 Agente dispersante : Nenhum  
 Operador : MANUEL  
 Empresa : Eurocalcio  
 Localização : Fátima  
 Data : 07-05-2013 Hora : 10:21:38  
 Índice med. : 4741

Ultrasom : 60 s  
 Concentração : 242  
 Diâmetro a 10% : 0.91 mu  
 Diâmetro a 50% : 7.93 mu  
 Diâmetro a 90% : 81.01 mu  
 Fraunhofer  
 Densidade/Fator : -----  
 Superfície específica : -----  
 Diluição automática : Não / Não  
 Medida./Limp. : 60/60/6  
 SOP : MarcCE

Valores cumulativos particulares					in volume / passante			
x	40.00	63.00	100.0	125.0	150.0	160.0	180.0	200.0
Q3	70.25	82.28	95.71	99.00	99.88	99.96	100.00	100.00

x : diâmetro / mu    Q3 : valor cumulativo / %    q3 : Histograma / %

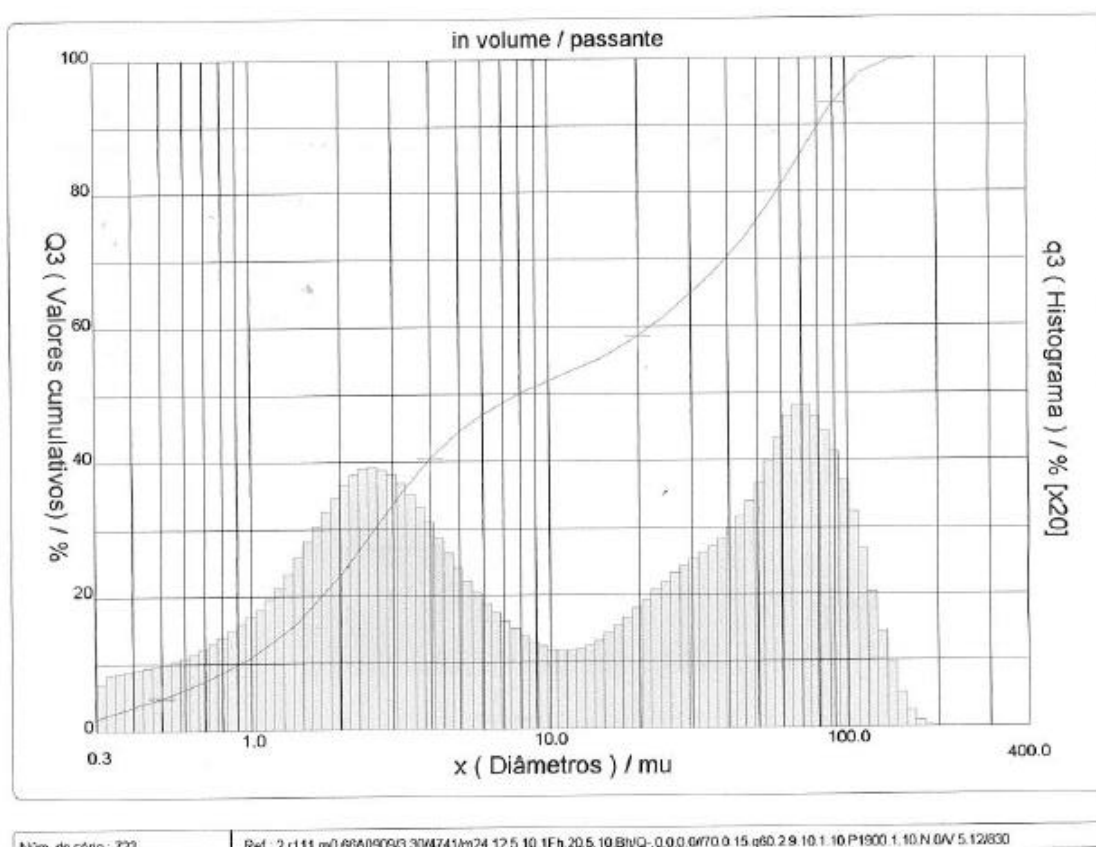



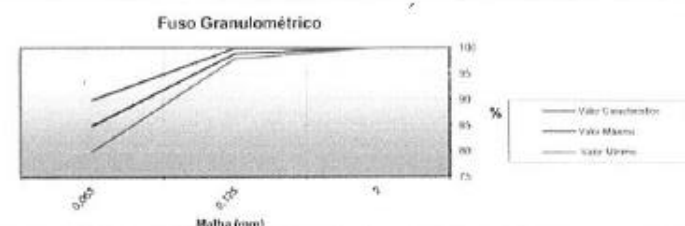
Figura E.4 – Ficha técnica do filer comercial (distribuição granulométrica).

 <b>CE 1029</b>				
<b>EUROCÁLCIO - Calcários e Inertes, SA</b> Vale de Ourém, S. Mamede - Apartado 96 - 2495-908 Fátima Centro de Produção: Fábrica "Vale de Ourém"				
<b>06</b> NP EN 13043:2004/AC:2010 Agregados Misturas Betuminosas CCPF Nº 1029 - CPD - PT06/01944	<b>NP EN 12620:2002+A1:2010</b> Agregados para Betão CCPF Nº 1029 - CPD - PT05/01472	<b>05</b> NP EN 13139:2005/AC:2010 Agregados para Argamassas CCPF Nº 1029 - CPD - PT05/01473		
<b>Desig. Comercial: RC 480</b>	<b>NP EN 12620:2002+A1:2010</b>	<b>NP EN 13043:2004/AC:2010</b>	<b>NP EN 13139:2005/AC:2010</b>	
<b>Caracterização</b>	<b>Betão</b>	<b>Mist. Betuminosas</b>	<b>Argamassas</b>	
<b>Tipo de agregado</b>	<b>Filer</b>	<b>Filer</b>	<b>Filer</b>	
<b>REQUISITOS FÍSICOS</b>				
Qualidade dos Finos - Azul Metileno	MBs 2g/kg	MBs 10	NR	
Massa Volumétrica das partículas	2,71 Mg/m³	2,71±0,1 Mg/m³	2,71 Mg/m³	
Teor de Humidade	NA	< 0,5 %	NA	
Vazios do filer seco compactado (Rigden)	NA	DND	NA	
"Variação da temperatura anel e bola"	NA	DND	NA	
Solubilidade na Água	NA	< 0,2%	NA	
Susceptibilidade à Água	NA	DND	NA	
"Número de batume"	NA	DND	NA	
Superfície Específica - Método Blaine	NA	3680 cm²/g	NA	
Durabilidade: Reactividade Alcalis-Silica	0,00%	NA	0,00%	
<b>REQUISITOS QUÍMICOS</b>				
Teor de Cloretos	< 0,001%	NA	< 0,001%	
Sulfatos solúveis em ácido	ASs2	NA	ASs2	
Enxofre total	< 0,04%	NA	< 0,04%	
Teor de húmus	mais claro	NA	mais claro	
Teor de Carbonato	CO <sub>2</sub>	44±1%	NA	
	CaCO <sub>3</sub>	99±1%	NA	
<b>Descrição Petrográfica Simplificada "R"</b>	<b>Agregado</b>	<b>Minerais</b>	<b>Forma e Angulosidade</b>	<b>Condições de superfície</b>
	Fragmentos de rocha	Calcário	Forma: subprismático a subicosa Angulosidade: muito anguloso a subanguloso	Rugosa

Nota: Produto obtido a partir de pedra natural, pelo que está sujeito a algumas variações (cor) resultantes do processo de formação da própria pedra


**GRANULOMETRIA**


Malha (mm)	Granulometria Típica (%)	Tolerâncias	
		Valor Mínimo	Valor Máximo
2	100	100	100
0,125	99	98	100
0,063	85,0	80,0	90,0



**Fuso Granulométrico**

FICHA Nº	M. Calcário (kg/m³)	C. Calcário	PTE (Porcentagem de Silica Total)	R. Betão (kg/m³)
1. Caracterização	2. Valor característico	3. Valor máximo permitido	4. Valor mínimo permitido	5. Valor máximo permitido

Elaborou: 

Aprovou: 

Data: 30-04-2012

Figura E.5 – Ficha técnica do filer comercial (restantes características).





## ANEXO F

### 1. Estudo de Marshall (BBr)

Na primeira abordagem à formulação, com os agregados disponibilizados (Figura F.1), definiram-se à priori as percentagens indicadas na Tabela F.1, as quais encaixaram entre os limites estabelecidos na Tabela 14.03.2I do CEEP (Tabela F.2).

Tabela F.1 – Percentagens da Curva Granulométrica 1.

Agregado	Brita Basáltica 10/16	Brita Basáltica 4/12	Pó de Pedra Calcário 0/4	Fíler Comercial
%	22,5	51,0	19,0	7,5

Tabela F.2 – Limites do fuso granulométrico da mistura AC14 Surf (BBr).

AC14 Surf (BBr)		
% Acumulada de Material Passado		
Peneiros Série Base + Série 2	Fuso Inferior	Fuso Superior
20	100	100
14	90	100
10	62	78
4	30	44
2	22	30
0,5	12	21
0,125	7	13
0,063	4	9



Figura F.1 – Pó de pedra 0/4 e Brita 4/12 usados na primeira abordagem à formulação.

Os resultados revelaram estabilidades ao ensaio de compressão na prensa de Marshall inferiores o limite de 12,5 kN e deformações superiores os valores expectáveis, de 2 a 4mm. Visualmente, a mistura apresentava um aspeto dúctil, quase deformável ao toque, assumindo um comportamento plástico, possivelmente devido à introdução de 7,5% de fíler, que, de acordo com Bardini *et al.* (2009), excede a concentração crítica deste

componente na mistura, ou seja, depois de atingido este patamar, o sistema fíler-ligante, o mástique, deixa de ser viscoso, transformando o seu escoamento em não-newtoniano ou plástico.

Acresceram aos resultados negativos, a dificuldade de introduzir a quantidade de betume correta para atingir a percentagem pretendida e o acerto das massas nos moldes, de modo a obter uma massa minimamente constante entre as cinco percentagens, devido à in experiência relativamente ao elevado peso volúmico dos agregados de origem basáltica.

Depois de efetuadas várias repetições, com a finalidade de realizar despistes de eventuais erros de execução, optou-se por alterar o pó de pedra utilizado, para um de granulometria ligeiramente superior (0/6) e alterar as percentagens granulométricas, por forma a resolver a situação da ductilidade devida à excessiva quantidade de fíler. A segunda granulometria testada encontra-se na Tabela F.3. Testou-se ainda uma inversão das percentagens de brita, de 32,0% para a Brita 10/16 e 25,0% para a Brita 2, alteração que encostou o fuso da mistura ao fuso inferior, na tentativa de produzi-la o mais rugosa possível.

Tabela F.3 – Percentagens da curva granulométrica 2.

Agregado	Brita Basáltica 10/16	Brita Basáltica 4/12	Pó de Pedra Calcário 0/4	Fíler Comercial
%	25,0	32,0	39,5	3,5

Estas alterações foram incapazes de colocar a mistura dentro dos limites impostos para a estabilidade. Uma vez mais foram realizadas repetições para despistar erros de operação.

A terceira tentativa passou por testar as percentagens granulométricas de uma formulação cedida, a quais constam da Tabela F.4.

Tabela F.4 – Percentagens da curva granulométrica 3.

Agregado	Brita Basáltica 10/16	Brita Basáltica 4/12	Pó de Pedra Calcário 0/4	Fíler Comercial
%	23,0	41,0	31,0	5,0

Com estas percentagens granulométricas produziu-se uma mistura bastante rugosa, o que resultou na consequente fragilização da mesma, reduzindo mais ainda as estabilidades, ainda que as deformações tenham encaixado dentro dos limites impostos. E, mais uma vez, foram feitos os necessários despistes.

Neste patamar estabeleceram-se dois parâmetros fulcrais: a brita 2, que esteve até então a ser empregue, era demasiado lamelar, dificultando o processo de compactação, o que se traduzia em baixas resistência ao ensaio de compressão, optou-se então por substituí-la por uma brita mais arredondada, com um melhor fator de forma, de granulometria 8/12,5; a aplicação de 5% de filer como a percentagem ideal, para assegurar a contribuição para a capacidade resistente da mistura.

Partindo das segundas percentagens granulométricas, realizou-se uma nova tentativa, com as percentagens Tabela F.5.

Tabela F.5 – Percentagens da curva granulométrica 4.

Agregado	Brita Basáltica 10/16	Brita Basáltica 4/12	Pó de Pedra Calcário 0/4	Fíler Comercial
%	25,0	32,0	38,0	5,0

As estabilidades começaram finalmente a subir, de forma evidente. Porém, surgiu outra condicionante, as porosidades estavam muito aquém do que seria suposto, muito baixas, logo nos provetes de 4%. Com o intuito de resolver esta questão optou-se, primeiramente, por aumentar a massa dos provetes, de modo a dificultar a compactação, o que se verificou infrutífero e então, abrir a curva granulométrica, testando as percentagens da Tabela F.6. A mudança para estas percentagens não foi aleatória, foram produzidos manualmente e ensaiados vários provetes testes.

Tabela F.6 – Percentagens da curva granulométrica 5.

Agregado	Brita Basáltica 10/16	Brita Basáltica 4/12	Pó de Pedra Calcário 0/4	Fíler Comercial
%	31,0	32,0	34,0	5,0

Em consequência desta alteração íngreme da abertura da curva granulométrica verificou-se novamente a redução das estabilidades, contudo estabeleceu-se finalmente um ponto fundamental da formulação: o método do provete saturado com superfície seca (método B - EN 12697-6) não permite determinar corretamente as baridades deste tipo de material, possivelmente porque ao ser um material de superfície consideravelmente rugosa, os seus poros enchiam-se de água e esse peso era continuamente considerado no peso submerso do provete. Esta conclusão adveio do facto de ao se abrir consecutivamente a curva, as baridades obtidas, em vez de irem também diminuindo sucessivamente, na verdade iam aumentando. Assim, definiu-se o método selado (método C – EN 12697) como a metodologia indicada, embora mais trabalhosa, tal como a própria norma refere.

Estabelecida a nova metodologia, tentou-se novamente obter os resultados com as granulometrias da curva granulométrica 5 por ser a com melhores resultados até à data e verificaram-se bons valores de estabilidade, porém porosidades um pouco abaixo do esperado. Com base nisto definiu-se aquela que foi a curva final da formulação, intermédia às duas anteriores (Tabela F.7).

Tabela F.7 – Percentagens da curva granulométrica 6.

Agregado	Brita Basáltica 10/16	Brita Basáltica 4/12	Pó de Pedra Calcário 0/4	Fíler Comercial
%	27,0	32,0	36,0	5,0

## ANEXO G

## 1. Dimensão e Baridade dos Provetes – Sensibilidade à Água (BBr)

Tabela G.1 – Dimensões e baridades dos provetes para a determinação da Sensibilidade à Água.

Dimensões – EN 12697-29												
Mistura	MBQ						MBT					
Nº Proвете	1	2	3	4	5	6	1T	2T	3T	4T	5T	6T
Média das Espessuras (0,1mm)	62,8	62,2	62,5	62,3	62,5	63,1	61,4	61,1	61,7	61,4	61,4	61,5
Média dos Diâmetros (0,1mm)	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	101,6	101,7	101,7
Baridade – Método C (Provetes Selados) – EN 12697-6												
Nº Proвете	1	2	3	4	5	6	1T	2T	3T	4T	5T	6T
$\rho_{bsea}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	2,504	2,515	2,496	2,514	2,504	2,492	2,543	2,544	2,530	2,552	2,542	2,543

## 2. Volume dos Provetes do Subgrupo Húmido Após Vácuo (BBr)

Tabela G.2 – Verificação da variação de volume dos provetes do subgrupo húmido após vácuo.

Dimensões – EN 12697-29						
Verificação das dimensões/volume dos provetes do conjunto húmido após vácuo						
Mistura	MBQ			MBT		
Nº Proвете	1	2	6	1T	5T	6T
Média das Espessuras (0,1mm)	62,7	62,2	63,1	61,3	61,4	61,5
Média dos Diâmetros (0,1mm)	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7	101,7
VOLUME (mm <sup>3</sup> )	509325	504585	511919	498030	498313	498990
VOLUME antes do vácuo (mm <sup>3</sup> )	510004	504919	512545	498688	498410	499047
$\Delta V$ aceitável até 2%						
$\Delta V$ (%)	0,13%	0,07%	0,12%	0,13%	0,02%	0,01%



## ANEXO H

1. Dimensões das Lajes – *Wheel Tracking* (BBr)

Tabela H.1 – Dimensões das lajes do ensaio de Pista.

Dimensões – EN 12697-29 (mm)					
Laje	1	2	1T	2T	
Espessura (0,1mm)	60,2	60,6	61,1	60,6	
Espessura (0,1mm)	60,7	62,0	61,0	60,7	
Espessura (0,1mm)	60,8	61,7	60,9	60,7	
Espessura (0,1mm)	60,3	61,0	61,3	61,1	
Largura (0,1mm)	290,0	289,5	279,0	280,0	
Largura (0,1mm)	290,5	289,5	279,0	279,5	
Largura (0,1mm)	290,5	289,5	279,0	279,5	
Largura (0,1mm)	290,5	289,5	279,0	279,5	
Largura (0,1mm)	290,5	289,5	279,0	280,0	
Comprimento (0,1mm)	399,5	401,0	398,5	399,0	
Comprimento (0,1mm)	399,5	401,0	398,0	399,0	
Comprimento (0,1mm)	399,5	401,0	398,0	399,0	
Comprimento (0,1mm)	399,0	401,0	398,5	399,0	
Média das espessuras (0,1mm)	60,5	61,3	61,1	60,8	
Média das larguras (0,1mm)	290,4	289,5	279,0	279,7	
Média dos comprimentos (0,1mm)	399,4	401,0	398,3	399,0	

2. Baridade das Lajes – *Wheel Tracking* (BBr)

Tabela H.2 – Baridades das lajes do ensaio de Pista.

Baridade – EN 12697-6 (Mg/m <sup>3</sup> )			
MBQ	Geométrica (Método D)	2,472	2,479
		2,485	
MBQ	Provete Saturado com Superfície Seca (SSD) (Método B)	2,561	2,555
		2,548	
MBT	Geométrica (Método D)	2,487	2,487
		2,486	
MBT	Provete Saturado com Superfície Seca (SSD) (Método B)	2,558	2,558
		2,557	

### 3. Profundidade da Rodeira - $RD_{AIR}$ (BBr)

Tabela H.3 – Evolução da rodeira ao longo do ensaio de Pista.

$RD_{AIR}$ (mm)		
Mistura	MBQ	MBT
Ciclo de Carga	Valor médio	Valor médio
0	0,07	0,05
250	0,87	1,13
500	1,12	1,40
1000	1,47	1,66
1500	1,74	1,82
2000	1,99	1,99
2500	2,23	2,10
3000	2,47	2,20
3500	2,70	2,27
4000	2,90	2,35
4500	3,16	2,39
5000	3,39	2,45
5500	3,54	2,50
6000	3,72	2,54
6500	3,85	2,55
7000	4,00	2,59
7500	4,13	2,65
8000	4,23	2,68
8500	4,35	2,72
9000	4,46	2,74
9500	4,56	2,76
10000	4,69	2,81



## **ANEXO I**


### **1. Relatórios de Ensaio do Betume**

Apresentam-se neste anexo os relatórios de ensaio das características básicas e especificamente da viscosidade dinâmica do betume branco e do betume aditivado com as três percentagens de Sasobit®.

## 1.1. Amostra de PMB 45/80-65


## A. Características Básicas

**Relatório de Ensaio**




LIGANTES BETUMINOSOS, S.A.

Laboratório de ensaios de ligantes e misturas betuminosas



NIDIN



acreditação

L0551  
Ensaios

**Relatório de ensaio nº** RE 2013/0507

**Refª Interna** A 2013/0507

**Data de Emissão** 05-Set-13

**Cliente** NIDIN - Estágios

**Anexos (boletins Ensaio)** BE 2013/1397 BE 2013/1398

**Página :** 1 / 1

**1. Amostra**

1.1 Data recepção: 29-Jul-13 Produto : Betume Performance PMB 45/80-65

N.º do Lote : Amostra Refª Externa :

1.2. Caracterização da amostra:

Consistência : Sólido Presença de Contaminantes : Não

**2. Colheita da amostra**

Responsabilidade da colheita da amostra : Cliente

**3. Preparação da amostra**

A preparação da amostra consistiu na fluidificação da mesma nas condições indicadas de seguida:

Quantidade da toma [kg/Lts]	2	T fluidificação [°C]	155
Tempo aquecimento [min]	90	Tipo de agitação	Manual


**4. Resumo ensaios**

Data de realização do(s) ensaio(s) :	de	29-Jul-13	a	29-Jul-13
<b>Ensaio</b>				<b>Norma</b>
Determinação da penetração				NP EN 1426 : 2010
<b>Boletim Ensaio</b>				<b>Resultado</b>
BE 2013/1397				55 (1/10mm)
<b>Ensaio</b>				<b>Norma</b>
Determinação da temperatura de amolecimento				NP EN 1427 : 2010
<b>Boletim Ensaio</b>				<b>Resultado</b>
BE 2013/1398				72,8 °C

**5. Observações**

Amostra para Estagiários

**O responsável técnico**

  
Cátia Mendes Duarte


Unidade de Produção do Rio Maior (Sede)  
Zona Industrial, 2040-998 Rio Maior  
Tel.: +351 243 999 240 | Fax.: +351 243 999 241  
E-mail: riomaior@probigal.pt

Mod 0016.03  
Rev.02 | 16/Nov.2012


Figura I.1 – Características básicas da amostra de PMB 45/80-65.

## B. Viscosidade Dinâmica

**Relatório de Ensaio**




**probigalp**  
LIGANTES BETUMINOSOS S.A.  
Laboratório de ensaios de ligantes e misturas betuminosas



**NIDIN**  
Sistema de Inspeção e Monitoramento em Tempo Real

**Cliente**  
NIDIN - Estágios



**IPAC**  
acreditação

L0551  
Ensaios

**Relatório de ensaio nº** RE 2013/0566  
**Refª Interna** A 2013/0566  
**Data de Emissão** 04-Set-13

**Anexos (boletins Ensaio)** BE 2013/1539

Página : 1 / 1

**1. Amostra**

1.1 Data recepção: 29-Jul-13 Produto: Betume Performance PMB 45/80-65  
N.º do Lote: Amostra Refª Externa:

1.2 Caracterização da amostra: Consistência: Sólido Presença de Contaminantes: Não

**2. Colheita da amostra**  
Responsabilidade da colheita da amostra: Cliente

**3. Preparação da amostra**  
A preparação da amostra consistiu na fluidificação da mesma nas condições indicadas de seguida:

Quantidade da toma [kg/Lts]	2	T fluidificação [°C]	155
Tempo aquecimento [min]	90	Tipo de agitação	Manual

**4. Resumo ensaios**


Data de realização do(s) ensaio(s): de 20-Ago-13 a 20-Ago-13

Ensaio	Norma
(*) Determinação da viscosidade Dinâmica	EN 13302 : 2010
Boletim Ensaio BE 2013/1539	Res. A 135°C 2183 (mPa.s)

**5. Observações**

Referente à amostra A 2013/0507  
VSR a 110, 115, 120, 130, 135, 140 °C

Os ensaios assinalados com (\*) não se encontram acreditados.

**O responsável técnico**  
  
Cátia Mendes Duarte

Unidade de Produção do Rio Maior (Sede)  
Zona Industrial, 2040-998 Rio Maior  
Tel.: +351 243 999 240 | Fax: +351 243 999 241  
E-mail: riomaior@probigalp.pt

Mod 0016.03  
Rev.03 | 16-Nov-2012

Figura I. 2 – Viscosidade dinâmica da amostra de PMB 45/80-65 (parte1).

## Relatório de Ensaio

**probigalp**  
LIGANTES BETUMINOSOS S.A.

Laboratório de ensaios de ligantes e misturas betuminosas



**IPAC**  
acreditação

L0551  
Ensaios

Relatório de  
ensaio nº RE 2013/0567

Refª Interna A 2013/0567

Data de  
Emissão 04-Set-13

Cliente

NIDIN - Estágios

Anexos (boletins  
Ensaio)

BE 2013/1540

Página : 1 / 1

### 1. Amostra

1.1 Data recepção: 29-Jul-13 Produto : Betume Performance PMB 45/80-65  
N.º do Lote : Amostra Refª Externa :  
1.2. Caracterização da amostra: Consistência : Sólido Presença de Contaminantes : Não

### 2. Colheita da amostra

Responsabilidade da colheita da amostra : Cliente

### 3. Preparação da amostra

A preparação da amostra consistiu na fluidificação da mesma nas condições indicadas de seguida:

Quantidade da toma [kg/Lts]	2	T fluidificação [°C]	155
Tempo aquecimento [min]	90	Tipo de agitação	Manual

### 4. Resumo ensaios

Data de realização do(s) ensaio(s) : de 20-Ago-13 a 20-Ago-13

<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>
(*) Determinação da viscosidade Dinâmica	EN 13302 : 2010
<b>Boletim Ensaio</b>	<b>Res. A 150°C</b>
BE 2013/1540	1287 (mPa.s)

### 5. Observações

Referente à amostra A 2013/0507  
VSR a 150, 160, 170, 180, 190 e 195 °C

Os ensaios assinalados com (\*) não se encontram acreditados.

O responsável técnico

Cátia Mendes Duarte

Unidade de Produção de Rio Maior (Sede)  
Zona Industrial, 2040-998 Rio Maior  
Tel.: +351 243 999 240 | Fax.: +351 243 999 241  
E-mail: riomaior@probigalp.pt


Mod 0016.03  
Rev.03 | 16.Nov.2012

Figura I.3 – Viscosidade dinâmica da amostra de PMB 45/80-65 (parte2).


## 1.2. Amostra de PMB 45/80-65 com 2% de Aditivo

### A. Características Básicas


**Relatório de Ensaio**



LABORATÓRIO DE ENSAIOS DE LIGANTES E MISTURAS BETUMINOSAS



**Cliente**  
NIDIN - Estágios



acreditação

L0551  
Ensaio

**Relatório de ensaio nº** RE 2013/0580

**Refª Interna** A 2013/0580

**Data de Emissão** 04-Set-13

**Anexos (boletins Ensaio)** BE 2013/1559 BE 2013/1560 BE 2013/1561 BE 2013/1564

Página : 1 / 1

#### 1. Amostra

1.1 Data recepção: 27-Ago-13 Produto: Betume Mod. Aditivado

N.º do Lote: Amostra Refª Externa:

1.2. Caracterização da amostra: Consistência: Sólido Presença de Contaminantes: Não

#### 2. Colheita da amostra

Responsabilidade da colheita da amostra: Cliente

#### 3. Preparação da amostra

A preparação da amostra consistiu na fluidificação da mesma nas condições indicadas de seguida:

Quantidade da toma [kg/Lts]	2	T fluidificação [°C]	155
Tempo aquecimento [min]	90	Tipo de agitação	Manual


#### 4. Resumo ensaios

Data de realização do(s) ensaio(s):	de 27-Ago-13 a 28-Ago-13	
<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>	
Determinação da penetração	NP EN 1426 : 2010	
<b>Boletim Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	
BE 2013/1559	52 (1/10mm)	
<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>	
Determinação da temperatura de amolecimento	NP EN 1427 : 2010	
<b>Boletim Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	
BE 2013/1560	79,2 °C	
<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>	
(*) Determinação da recuperação elástica de betumes modificados	EN 13398 : 2010	
<b>Boletim Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	
BE 2013/1561	88 %	
<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>	
(*) Determinação da Resistência ao envelhecimento - RTFOT	NP EN 12607-1 : 2010	
<b>Boletim Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Resultado</b>
BE 2013/1564	81 % Pen. Ret.	0,8 °C Dif. Tem.
		-0,01 % Var. Massa

#### 5. Observações

Amostra com 2% de Sasobit

Os ensaios assinalados com (\*) não se encontram acreditados.

**O responsável técnico**  
  
Cátia Mendes Duarte


Unidade de Produção de Rio Maior (Sede)  
Zona Industrial, 2040-998 Rio Maior  
Tel.: +351 243 999 240 | Fax.: +351 243 999 243  
E-mail: nomaior@probigalp.pt

Mod 0016.03  
Rev.03 | 15.Nov.2012

Figura I.4 – Características básicas da amostra de PMB 45/80-65 com 2% de aditivo.


## B. Viscosidade Dinâmica

**Relatório de Ensaio**




**probigalp**  
LIGANTES BETUMINOSOS S.A.

Laboratório de ensaios de ligantes e misturas betuminosas



**NIDIN**  
Núcleo de Investigação e Desenvolvimento em Engenharia de Probígalo

**Ciente**  
NIDIN - Estágios



**IPAC**  
acreditação

L0551  
Ensaaios

**Relatório de ensaio nº** RE 2013/0568

**Refª Interna** A 2013/0568

**Data de Emissão** 04-Set-13

**Anexos (boletins Ensaio)** BE 2013/1541

Página : 1 / 1

---

**1. Amostra**

1.1 Data recepção: 29-Jul-13 Produto: Betume Performance PMB 45/80-65

N.º do Lote: Amostra Refª Externa:

1.2. Caracterização da amostra: Consistência: Sólido Presença de Contaminantes: Não

---

**2. Colheita da amostra**

Responsabilidade da colheita da amostra: Cliente

---

**3. Preparação da amostra**

A preparação da amostra consistiu na fluidificação da mesma nas condições indicadas de seguida:

Quantidade da toma [kg/Lts]	2	T fluidificação [°C]	155
Tempo aquecimento [min]	90	Tipo de agitação	Manual

---

**4. Resumo ensaios**

Data de realização do(s) ensaio(s):	de	20-Ago-13	a	20-Ago-13
-------------------------------------	----	-----------	---	-----------


<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>
(*) Determinação da viscosidade Dinâmica	EN 13302 : 2010
<b>Boletim Ensaio</b>	
BE 2013/1541	
<b>Res. A 135°C</b>	
1704 (mPa.s)	

---

**5. Observações**

Amostra A 2013/0507 + 2% de Sasobit  
VSR a 100, 110, 115, 120, 130, 135 °C

Os ensaios assinalados com (\*) não se encontram acreditados.

**O responsável técnico**  
  
Cátia Mendes Duarte

Unidade de Produção de Rio Maior (Sede)  
Zona Industrial, 2040-998 Rio Maior  
Tel: +351 243 999 240 | Fax: +351 243 999 241  
E-mail: riomaior@probigalp.pt

Mod 0016.03  
Rev.03 | 16-Nov-2012

Figura I.5 – Viscosidade dinâmica da amostra de PMB 45/80-65 com 2% de aditivo (parte1).

## Relatório de Ensaio



Laboratório de ensaios de ligantes e misturas betuminosas



Cliente

NIDIN - Estágios

L0551  
EnsaiosRelatório de  
ensaio nº

RE 2013/0569

Refª Interna

A 2013/0569

Data de  
Emissão

04-Set-13

Anexos (boletins  
Ensaio)

BE 2013/1542

## 1. Amostra

Página : 1 / 1

1.1 Data recepção: 29-Jul-13 Produto : Betume Mod. Aditivado

N.º do Lote : Amostra Refª Externa :

1.2. Caracterização da amostra: Consistência : Sólido Presença de Contaminantes : Não

## 2. Colheita da amostra

Responsabilidade da colheita da amostra : Cliente

## 3. Preparação da amostra

A preparação da amostra consistiu na fluidificação da mesma nas condições indicadas de seguida:

Quantidade da toma [kg/Lts]	2	T fluidificação [°C]	155
Tempo aquecimento [min]	90	Tipo de agitação	Manual

## 4. Resumo ensaios

Data de realização do(s) ensaio(s) : de 20-Ago-13 a 20-Ago-13

Ensaio	Norma
(*) Determinação da viscosidade Dinâmica	EN 13302 : 2010
Boletim Ensaio	Res. A 140°C
BE 2013/1542	1421 (mPa.s)

## 5. Observações

Amostra A 2013/0507 + 2% de Sasobit  
VSR a 140, 150, 160, 170 e 175 °C

O responsável técnico

Os ensaios assinalados com (\*) não se encontram acreditados.

Cátia Mendes Duarte

Unidade de Produção de Rio Maior (Sede)  
Zona Industrial, 2040-998 Rio Maior  
Tel.: +351 243 999 240 | Fax.: +351 243 999 241  
E-mail: rlomazon@probigalp.pt


Mod 0016.03  
Rev.03 | 10.Nov.2012

Figura I.6 – Viscosidade dinâmica da amostra de PMB 45/80-65 com 2% de aditivo (parte2).

### 1.3. Amostra de PMB 45/80-65 com 3% de Aditivo


#### A. Características Básicas

**Relatório de Ensaio**




**probigalp**  
LIGANTES BETUMINOSOS S.A.

Laboratório de ensaios de ligantes e misturas betuminosas



**NIDIN**  
Núcleo de Investigação e Desenvolvimento em Materiais e Processos



**IPAC**  
acreditação

L0551  
Ensaios

**Relatório de ensaio nº** RE 2013/0525

**Refª Interna** A 2013/0525

**Data de Emissão** 04-Set-13

**Anexos (boletins Ensaio)** BE 2013/1443 BE 2013/1444 BE 2013/1445 BE 2013/1446

**Cliente** NIDIN - Estágios

**Página :** 1 / 1

**1. Amostra**

1.1 Data recepção: 06-Ago-13 Produto : Betume Mod. Aditivado

N.º do Lote : Ver Obs. Refª Externa :

1.2. Caracterização da amostra: Consistência : Sólido Presença de Contaminantes : Não

**2. Colheita da amostra**

Responsabilidade da colheita da amostra : Cliente

**3. Preparação da amostra**

A preparação da amostra consistiu na fluidificação da mesma nas condições indicadas de seguida:

Quantidade da toma [kg/Lts]	1	T fluidificação [°C]	100
Tempo aquecimento [min]	60	Tipo de agitação	Manual


**4. Resumo ensaios**

Data de realização do(s) ensaio(s) :	de	06-Ago-13	a	06-Ago-13
<b>Ensaio</b>				<b>Norma</b>
Determinação da penetração				NP EN 1426 : 2010
<b>Boletim Ensaio</b>	<b>Resultado</b>			
BE 2013/1443	40 (1/10mm)			
<b>Ensaio</b>				<b>Norma</b>
Determinação da temperatura de amolecimento				NP EN 1427 : 2010
<b>Boletim Ensaio</b>	<b>Resultado</b>			
BE 2013/1444	88,5 °C			
<b>Ensaio</b>				<b>Norma</b>
(*) Determinação da recuperação elástica de betumes modificados				EN 13398 : 2010
<b>Boletim Ensaio</b>	<b>Resultado</b>			
BE 2013/1445	94 %			
<b>Ensaio</b>				<b>Norma</b>
(*) Determinação da Resistência ao envelhecimento - RTFOT				NP EN 12607-1 : 2010
<b>Boletim Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Resultado</b>		
BE 2013/1446	63 % Pen. Ret.	2,0 °C Dif. Tem.	-0,34 % Var. Massa	

**5. Observações**

Amostra A2013/0507 + 3% de Sasobit

Os ensaios assinalados com (\*) não se encontram acreditados.

**O responsável técnico**  
  
Cátia Mendes Duarte

Unidade de Produção do Rio Maior (Sede)  
Zona Industrial, 2040-998 Rio Maior  
Tel.: +351 243 999 240 | Fax.: +351 243 999 241  
E-mail: rionmaior@probigalp.pt


Mod 0016.03  
Rev.03 | 16.Nov.2012

Figura I.7 – Características básicas da amostra de PMB 45/80-65 com 3% de aditivo.




## B. Viscosidade Dinâmica

**Relatório de Ensaio**



**Cliente**  
NIDIN - Estágios



**Anexos (boletins Ensaio)**  
BE 2013/1570

**Relatório de ensaio nº** RE 2013/0584

**Refª Interna** A 2013/0584

**Data de Emissão** 04-Set-13

---

**1. Amostra** Página : 1 / 1

1.1 Data recepção: 27-Ago-13 Produto : Betume Mod. Aditivado

N.º do Lote : Ver Obs. Refª Externa :

1.2. Caracterização da amostra: Consistência : Sólido Presença de Contaminantes : Não

**2. Colheita da amostra** Responsabilidade da colheita da amostra : Cliente

**3. Preparação da amostra**

A preparação da amostra consistiu na fluidificação da mesma nas condições indicadas de seguida:

Quantidade da toma [kg/Lts]	1	T fluidificação [°C]	100
Tempo aquecimento [min]	60	Tipo de agitação	Manual


**4. Resumo ensaios**

Data de realização do(s) ensaio(s) :	de	22-Ago-13	a	22-Ago-13
<b>Ensaio</b>		<b>Norma</b>		
(*) Determinação da viscosidade Dinâmica		EN 13302 : 2010		
<b>Boletim Ensaio</b>		<b>Res. A 135°C</b>		
BE 2013/1570		1561 (mPa.s)		

---

**5. Observações**

Amostra A2013/0507 + 3% de Sasobit (Repetição com nova preparação)  
VSR a 110, 115, 120, 130, 135, 140 °C

**O responsável técnico**  
  
Cátia Mendes Duarte

Os ensaios assinalados com (\*) não se encontram acreditados.

Unidade de Produção de Rio Maior (Sede)  
Zona Industrial, 2040-938 Rio Maior  
Tel.: +351 243 999 249 | Fax: +351 243 999 241  
E-mail: riomaior@probigalp.pt

Mod 0016.03  
Rev.03 | 16.Nov.2012

Figura I.8 – Viscosidade dinâmica da amostra de PMB 45/80-65 com 3% de aditivo (parte1).

## Relatório de Ensaio

**probigalp**  
LIGANTES BETUMINOSOS S.A.

Laboratório de ensaios de ligantes e misturas betuminosas



**IPAC**  
acreditação

L0551  
Ensaios

Relatório de  
ensaio nº RE 2013/0585

Refª Interna A 2013/0585

Data de  
Emissão 04-Set-13

## Cliente

NIDIN - Estágios

Anexos (boletins  
Ensaio)

BE 2013/1571

**1. Amostra** Página : 1 / 1

1.1 Data recepção: 27-Ago-13 Produto : Betume Mod. Aditivado  
N.º do Lote : Ver Obs. Refª Externa :  
1.2. Caracterização da amostra: Consistência : Sólido Presença de Contaminantes : Não

**2. Colheita da amostra**  
Responsabilidade da colheita da amostra : Cliente

**3. Preparação da amostra**  
A preparação da amostra consistiu na fluidificação da mesma nas condições indicadas de seguida:  
Quantidade da toma [kg/Lts] 1 T fluidificação [°C] 100  
Tempo aquecimento [min] 60 Tipo de agitação Manual

**4. Resumo ensaios**  
Data de realização do(s) ensaio(s) : de 22-Ago-13 a 22-Ago-13  
Ensaio Norma  
(\* ) Determinação da viscosidade Dinâmica EN 13302 : 2010  
Boletim Ensaio Res. A 140°C  
BE 2013/1571 1243 (mPa.s) 169°C

## 5. Observações

Amostra A2013/0507 + 3% de Sasobit (Repetição com nova preparação)  
VSR a 150, 160, 170 °C

O responsável técnico

Cátia Mendes Duarte

Os ensaios assinalados com (\*) não se encontram acreditados.

Unidade de Produção de Rio Maior (Sede)  
Zona Industrial, 2040-998 Rio Maior  
Tel.: +351 243 999 240 | Fax.: +351 243 999 241  
E-mail: riomaior@probigalp.pt


Mod 0016.03  
Rev.03 | 16. Nov. 2012

Figura I.9 – Viscosidade dinâmica da amostra de PMB 45/80-65 com 3% de aditivo (parte2).


# 1.4. Amostra de PMB 45/80-65 com 4% de Aditivo

## A. Características Básicas e Viscosidade Dinâmica


**Relatório de Ensaio**



**LIQUANTES BETUMINOSOS S.A.**  
Laboratório de ensaios de ligantes e misturas betuminosas



**NIDIN**  
Núcleo de Investigação e Desenvolvimento em Infraestruturas



**IPAC**  
accreditação

L0551  
Ensaaios

**Relatório de ensaio nº** RE 2013/0509

**Refª Interna** A 2013/0509

**Data de Emissão** 04-Set-13

**Anexos (boletins Ensaio)** BE 2013/1401 BE 2013/1402 BE 2013/1403  
BE 2013/1404 BE 2013/1405 BE 2013/1406

**Ciente** NIDIN - Estágios

Página : 1 / 1

**1. Amostra**

1.1 Data recepção: 29-Jul-13 Produto: Betume Mod. Aditivado

N.º do Lote: Ver Obs. Refª Externa:

1.2. Caracterização da amostra: Consistência: Sólido Presença de Contaminantes: Não

**2. Colheita da amostra**

Responsabilidade da colheita da amostra: Cliente

**3. Preparação da amostra**

A preparação da amostra consistiu na fluidificação da mesma nas condições indicadas de seguida:

Quantidade da toma [kg/Lts]	1	T fluidificação [°C]	100
Tempo aquecimento [min]	60	Tipo de agitação	Manual


**4. Resumo ensaios**

Data de realização do(s) ensaio(s):	de 29-Jul-13 a 31-Jul-13	
<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>	
Determinação da penetração	NP EN 1426 : 2010	
<b>Boletim Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	
BE 2013/1401	44 (1/10mm)	
<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>	
Determinação da temperatura de amolecimento	NP EN 1427 : 2010	
<b>Boletim Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	
BE 2013/1402	83,0 °C	
<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>	
(*) Determinação da recuperação elástica de betumes modificados	EN 13398 : 2010	
<b>Boletim Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	
BE 2013/1403	87 %	
<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>	
(*) Determinação da viscosidade Dinâmica	EN 13302 : 2010	
<b>Boletim Ensaio</b>	<b>Res. A 135°C</b>	
BE 2013/1404	1223 (mPa.s)	
<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>	
(*) Determinação do ponto de fragilidade de Fraass	EN 12593 : 2007	
<b>Boletim Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	
BE 2013/1405	-16 °C	
<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>	
(*) Determinação da Resistência ao envelhecimento - RTFOT	NP EN 12607-1 : 2010	
<b>Boletim Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Resultado</b>
BE 2013/1406	70 % Pen. Ret.	8,5 °C Dif. Tem.
		-0,28 % Var. Massa

**5. Observações**

Amostra A2013/0507 + 4% de Sasobit  
VSR a 100, 110, 115, 120, 130, 135, 140 e 150°C

Os ensaios assinalados com (\*) não se encontram acreditados.

O responsável técnico  
  
Cátia Mendes Duarte

Unidade de Produção de Rio Maior (Sede)  
Zona Industrial, 2040-998 Rio Maior  
Tel.: +351 243 999 240 | Fax.: +351 243 999 241  
E-mail: riomaior@probigalp.pt

Mod 0016.03  
Rev.03 | 16.Nov.2012

Figura I.10 – Características básicas e viscosidade dinâmica (parte1) da amostra de PMB 45/80-65 com 4% de aditivo.

## Relatório de Ensaio

**probigalp**  
LIGANTES BETUMINOSOS S.A.

Laboratório de ensaios de ligantes e misturas betuminosas



**Cliente**

NIDIN - Estágios

**IPAC**  
acreditação

L0551  
Ensaaios

**Relatório de  
ensaio nº**

RE 2013/0519

**Refª Interna**

A 2013/0519

**Data de  
Emissão**

04-Set-13

**Anexos (boletins  
Ensaio)**

BE 2013/1426

### 1. Amostra

**Página :** 1 / 1

1.1 Data receção: 29-Jul-13 Produto : Betume Mod. Aditivado  
N.º do Lote : Ver Obs. Refª Externa :  
1.2. Caracterização da amostra:  
Consistência : Sólido Presença de Contaminantes : Não

### 2. Colheita da amostra

Responsabilidade da colheita da amostra : Cliente

### 3. Preparação da amostra

A preparação da amostra consistiu na fluidificação da mesma nas condições indicadas de seguida:

Quantidade da toma [kg/Lts] 1 T fluidificação [°C] 100  
Tempo aquecimento [min] 60 Tipo de agitação Manual

### 4. Resumo ensaios

Data de realização do(s) ensaio(s) : de 29-Jul-13 a 29-Jul-13

Ensaio	Norma
(*) Determinação da viscosidade Dinâmica	EN 13302 : 2010
<b>Boletim Ensaio</b>	<b>Res. A 140°C</b>
BE 2013/1426	962 (mPa.s)

### 5. Observações

Amostra A2013/0507 + 4% de Sasobit  
VSR a 160 e 170°C

**O responsável técnico**

Os ensaios assinalados com (\*) não se encontram acreditados.

Cátia Mendes Duarte

Unidade de Produção do Rio Maior (Sede)  
Zona Industrial, 2040-998 Rio Maior  
Tel.: +351 243 999 240 | Fax.: +351 243 999 241  
E-mail: riomaior@probigalp.pt

Mod 0016.03  
Rev.03 | 16.Nov.2012

Figura I.11 – Viscosidade dinâmica da amostra de PMB 45/80-65 com 4% de aditivo (parte2).